4Rec

Generaciones cuánticas

Una historia de la física en el siglo XX

530.09
K71g
Ej.1

Helge Kragh

Traducción
Daniel Duque Campayo
Ana Granados Sanandrés
Manuel Sangüesa Lazcano

Revisión científica de
José Alberto Pérez Díez

np. 2008-03-19 (Golapar)
IAA

-akal-

Índice

Prólogo vii

Primera parte: de la consolidación a la revolución

1 Física finisecular: un modelo cambiante del mundo 3

2 El mundo de la física 13

3 Descargas en gases y lo que siguió 27

4 Arquitectura atómica 44

5 La lenta ascensión de la teoría cuántica 58

6 Física a bajas temperaturas 73

7 La relatividad de Einstein y de otros 86

8 Una revolución fallida 103

9 La física en la industria y en la guerra 118

Segunda parte: de la revolución a la consolidación

10 Ciencia y política en la República de Weimar 135

11 Saltos cuánticos 150

12 El surgimiento de la física nuclear 168

13 De dos partículas a muchas antipartículas 184

14 Implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica 199

15 El sueño de Eddington y otras heterodoxias 211

16 La física y las nuevas dictaduras 222

17 Fuga y ganancia de cerebros 237

18 Del enigma del uranio a Hiroshima 249

A1155437

Tercera parte: progreso y problemas

19 Temas nucleares 269

20 Militarización y megatendencias 285

21 Descubrimientos de partículas 302

22 Teorías fundamentales 322

23 La cosmología y el renacimiento de la relatividad 339

24 Elementos de la física del estado sólido 356

25 Física de ingeniería y electrónica cuántica 371

26 La ciencia atacada, ¿la física en crisis? 384

27 Unificaciones y especulaciones 399

Cuarta parte: una mirada atrás

28 La física Nobel 417

29 Un siglo de física en retrospectiva 431

Apéndice. Lecturas recomendadas 443

Bibliografía 453

Prólogo

Este trabajo fue escrito entre 1996 y 1998, ante la sugerencia de Princeton University Press. Originalmente, cuando acepté la invitación para escribir un libro sobre la historia de la física durante el siglo XX, pensé que sería una materia relativamente fácil. Pronto me espabilé. Debería haber sabido que simplemente no es posible escribir un relato de un volumen equilibrado y razonablemente completo de la física del siglo XX. Lo que sigue es un sustituto, una descripción bastante breve y muy condensada de lo que creo que han sido los desarrollos más significativos en un siglo de pensamiento y experimentación físicos que puede denominarse como *el más* importante siglo de la física.

El libro está estructurado en tres partes esencialmente cronológicas. La primera parte cubre el desarrollo entre la década de 1890 a aproximadamente 1918, al final de la Primera Guerra Mundial. La segunda parte se concentra en el desarrollo entre las dos guerras, sobre 1918-1945, y la tercera parte se dedica al desarrollo en el resto del siglo. La división en periodos no debería ser controvertida, como tampoco lo debería ser la decisión de empezar a mediados de la década de 1890 más que en 1900. Se acepta en general que la «física moderna» empezó con los grandes descubrimientos de los años 1890 y no con la introducción de la discontinuidad cuántica de Planck de 1900.

Me he esforzado en escribir un relato que llegue hasta el presente y que también incluya partes de muy reciente progreso que normalmente se consideraría «no histórico todavía». Surgen problemas al escribir de manera histórica sobre hechos recientes, pero éstos son problemas prácticos y no enraizados en la ciencia contemporánea yendo más allá del análisis histórico. El libro tiene una forma y tamaño que excluye cualquier ambición de exhaustividad, por no decir completitud. En cualquier caso, una historia «completa» de la física del siglo XX no tendría sentido al ser imposible de rescribir desde un punto de vista práctico. Como la mayoría de los trabajos históricos, éste es selectivo y limitado en su alcance y contenido. Las selecciones indudablemente pueden ser criticadas. El material que he elegido ha sido incluido por variadas razones, siendo una de ellas la disponibilidad de escritos y análisis históricos. El objetivo del li-

bro es dar cuenta del desarrollo de la física durante un periodo de cien años que sea digerible, informativo y suficientemente representativo. Existen, inevitablemente, muchos objetos de estudio y subdisciplinas que no he incluido, en parte por falta de espacio y en parte por falta de fuentes secundarias. Entre los temas que había contemplado incluir en principio, pero que al final tuve que dejar fuera, están la óptica, la ciencia de materiales, la física química, la geofísica, la física médica, la física en los países del Tercer Mundo y el debate posterior a 1950 concerniente a la interpretación de la mecánica cuántica. Sin embargo, pienso que lo que se ha incluido no desmerece seriamente, a pesar de los criterios de selección más o menos arbitrarios, las tendencias generales en el progreso de la física moderna.

El problema de escribir un informe equilibrado es difícil, no solamente en relación con las subdisciplinas y sus proporciones sino también con relación a las naciones. La física siempre ha sido internacional, pero sin duda algunas naciones han contribuido más al progreso científico que otras. Mi descripción es básicamente una historia de la física en Europa y Norteamérica, con alguna mención también a las contribuciones japonesas. Esto es simplemente un reflejo de que las contribuciones importantes de la física se han distribuido entre las naciones y regiones geográficas. Guste o no, la mayoría de las naciones del mundo prácticamente no han desempeñado papel alguno en el desarrollo de la física moderna. Una de las tendencias significativas del periodo de la posguerra ha sido la predominancia de los físicos estadounidenses en una ciencia que originalmente era europea. Debido a esta predominancia, y por la fuerte posición que los investigadores estadounidenses tienen en la historia de la ciencia, el conocimiento histórico de la física moderna estadounidense es mucho más rico que el de la de Europa y otras regiones, incluyendo la antigua Unión Soviética. Es bastante posible que la predominancia relativa de escritos sobre físicos estadounidenses haya causado que mi descripción se centre demasiado en la escena estadounidense, pero teniendo en cuenta las circunstancias, no podía hacer mucho para evitarlo.

Tomados conjuntamente, los veintinueve capítulos cubren un amplio espectro de la física, no sólo con respecto a los géneros y disciplinas, sino también con respecto a las proporciones de la física. Siempre debería tener presente que la física (o las ciencias físicas) es un área rica y de múltiples facetas que tiene implicaciones mucho más allá de los aspectos puramente científicos relacionados con la física fundamental. Quise escribir un libro amplio, pero no tan amplio como para que perdiera el norte de qué es distintivamente el mundo de la física. Este libro no está consagrado solamente a los aspectos científicos o intelectuales de la física, pero tampoco se concentra en la historia social e institucional. Trata de integrar las distintas aproximaciones o al menos incluirlas de un modo razonablemente equilibrado. También he prestado más atención a la física aplicada o de ingeniería de lo que es habitual. Ignorar la interfase física-tecnología y concentrarse en la llamada física fundamental solamente, sin duda daría una descripción distorsionada de cómo se ha desarrollado la física en este siglo. No es sólo que la mayoría de los físicos del mundo está ocupada con aspectos aplicados de su ciencia, y así ha sido durante la mayor parte del siglo, sino que también en su mayoría

han sido las aplicaciones tecnológicas la vía por la que la física se ha convertido en una fuerza importante del cambio social.

El público objetivo de este libro no es principalmente físicos o especialistas en la historia de la ciencia. Es mi deseo que atraiga a un colectivo de lectores mucho más amplio y que pueda servir como libro de texto en cursos de naturaleza interdisciplinar o en cursos introductorios de física y de historia. Con unas cuantas excepciones, he evitado las ecuaciones, y aunque el libro presupone algo de conocimiento de física, está escrito en su mayor parte a un nivel elemental. Mi decisión de evitar el aparato de las notas que a menudo se ve como un distintivo de los que se llaman a sí mismos libros académicos es un intento de hacer que el texto sea más accesible a los lectores que no están familiarizados con el sistema de notas (a veces bastante artificial) de libros más eruditos. En casi todas las citas, he incluido referencias en el texto a fuentes donde pueden encontrarse con facilidad. Más que referirme a la fuente original, en muchos casos he hecho referencia a una fuente posterior, secundaria, muy a menudo el lugar donde recogí la cita. En un libro de estas características, no tiene sentido incluir numerosas referencias a antiguos artículos científicos de *Annalen der Physik* o de *Philosophical Magazine;* el lector que quisiera ahondar en la fuente original puede hacerlo a través de la fuente de la que he obtenido la cita. Todo el libro está, en gran medida, basado en fuentes secundarias, sobre todo los numerosos buenos libros y artículos escritos por historiadores de las ciencias físicas. También he extraído con libertad y de manera extensa de algunos de mis trabajos anteriores sobre la historia de la física moderna, la química, la tecnología y la cosmología.

El problema de las fuentes es bastante distinto en relación con la física en el último tercio o cuarto de siglo. Mientras que existe una abundancia de fuentes secundarias que lidian con progresos más antiguos en la física, escritos bien por historiadores o bien por participantes, sólo hay unos cuantos análisis históricos de la física posterior a 1960 (la física de altas energías es una excepción). En esta parte de la cronología, he tenido que cimentar mi informe en el material útil que existe, en las recopilaciones de los físicos más o menos informados de la historia y en un análisis no muy sistemático de lo que he podido encontrar en artículos y reseñas científicas. *Physics Today* ha sido una fuente fiable; las referencias a esta publicación en la tercera parte están abreviadas como *PT*. La bibliografía y el apéndice de «lecturas recomendadas» recogen una buena selección de la literatura que los lectores quizá deseen consultar para poder profundizar en los temas cubiertos por este libro.

El título de trabajo del libro era originalmente *Revolución a través de la tradición*. Con este título quería referirme a la dialéctica entre las teorías existentes y los cambios revolucionarios que han sido característicos de la física durante el siglo XX. Desde luego que ha habido revoluciones en las estructuras teóricas de la física, pero éstas no han sido rechazos en bloque de las tradiciones clásicas, muy al contrario, han estado sólidamente enlazadas con partes esenciales de la física de Newton, Maxwell y Helmholtz. La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, indudablemente las dos mayores revoluciones del pensamiento físico del siglo XX, se construyeron cuidadosamente para corresponderse con las teorías clásicas dentro de los límites clásicos.

El respeto por las tradiciones ha sido asimismo un hilo conductor en los mayores cambios teóricos que han ocurrido después de completar la mecánica cuántica. Hasta el punto de que éstas puedan ser calificadas como revolucionarias, han sido revoluciones conservadoras. Los cambios han sido mucho menos importantes en el ámbito metodológico que en el cognitivo. Han ocurrido algunos cambios, pero no de una naturaleza fundamental. Básicamente, los métodos aceptados por la ciencia de los años noventa del siglo XX son los mismos métodos aceptados en los años noventa del siglo XIX. Si buscamos cambios realmente radicales durante los tres últimos cuartos de siglo, no deberíamos fijarnos en los métodos, sino más bien en el propio tejido del mundo, la ontología de la física: o deberíamos mirar hacia las dimensiones social, económica y política. En términos de mano de obra, organización, dinero, instrumentos y valor político (y militar), la física experimentó un salto marcado en los años siguientes a 1945. Los cambios sociopolíticos hicieron de la física de 1960 una ciencia muy diferente de la que había sido un siglo antes, pero no causaron el correspondiente salto en los estándares metodológicos y cognitivos. En cualquier caso, éste no es el lugar para debatir a ningún nivel estos temas más amplios. En el libro que sigue he descrito, más que analizado, partes importantes del progreso de la física entre 1895 y 1995. Los lectores que estén interesados en contemplar una foto global, o evaluar los cambios revolucionarios y hacer comparaciones a lo largo del curso de un siglo, deberían estar mejor equipados con el material y la información que se presentan aquí.

Me gustaría expresar mi agradecimiento a mi colega Ole Knudsen, que leyó el manuscrito y sugirió varias mejoras.

Helge Kragh
Aarhus, Dinamarca

Primera parte:
de la consolidación a la revolución

CAPÍTULO 1

Física finisecular: un modelo cambiante del mundo

El filósofo y matemático Alfred North Whitehead se refirió una vez al último cuarto del siglo XIX como «una era de ortodoxia científica exitosa, no molestada por ningún pensamiento más allá de las convenciones [...] uno de los momentos del pensamiento más aburridos desde los tiempos de la Primera Cruzada» (Whitehead 1925, p. 148). Todavía es corriente creer que la física de fin de siglo fue un asunto algo aburrido, que se construía firme y complacientemente sobre la cosmovisión determinista y mecánica de Newton y sus seguidores. Nos cuentan que los físicos no estaban en absoluto preparados para las conmociones que ocurrieron en dos etapas: primero, el inesperado descubrimiento de los rayos X, el electrón y la radiactividad; y después la verdadera revolución, que consistió en el descubrimiento por parte de Planck del cuanto de acción en 1900 y la teoría de la relatividad de Einstein en 1905. De acuerdo con este aceptado punto de vista, no sólo la mecánica newtoniana gobernó soberana hasta que fue hecha añicos por las nuevas teorías, sino que la generación victoriana de físicos creía ingenuamente que todas las cosas que merecía la pena saber ya se sabían o se sabrían pronto siguiendo el camino de la física existente. Albert Michelson, el gran físico experimental americano, dijo en 1894 que «parece probable que la mayoría de los grandes principios fundamentales han sido esencialmente establecidos y que los futuros avances se deben buscar sobre todo en la aplicación rigurosa de estos principios a todos los fenómenos que nos interesen» (Basash 1972, p. 52). Cuán irónico, pues, que los nuevos rayos del profesor Röntgen –el primero de varios descubrimientos que se resistían a una explicación basada en los «grandes principios fundamentales»– se anunciaran tan sólo un año después. Y cuánto más importante parece la nueva física de principios del siglo XX si se compara con puntos de vista como los de Michelson.

El punto de vista aceptado es en parte un mito pero, como la mayoría de los mitos, está basado en hechos. Por ejemplo, Michelson no era el único físico de la década que expresó la sensación de que la física estaba esencialmente completa y que lo que quedaba era, o bien física aplicada, más en concreto medidas, o descubrimientos relativa-

mente menores. Cuando Max Planck ingresó en la Universidad de Múnich en 1875, un profesor de física le advirtió que la especialidad que había elegido estaba más o menos terminada y que no cabía esperar que se descubriera nada nuevo. Sin embargo, a pesar de que esta sensación ciertamente existía entre los físicos, es cuestionable cómo de extendida estaba. Muy pocos físicos teóricos de los 1890 parecen haber aceptado el punto de vista de Michelson, y tras los increíbles descubrimientos de Röntgen, Henri Becquerel, J. J. Thomson y los Curie, incluso el físico experimental más conservador se vio obligado a darse cuenta de su falacia.

¿Qué decir de la afirmación de que la física de hace cien años descansaba en la ortodoxia y la aceptación complaciente de la mecánica newtoniana? ¿Existía una cosmovisión mecanicista, o siquiera alguna cosmovisión comúnmente aceptada? Mientras que la cuestión de la completitud puede ser discutida, es absolutamente falso que los físicos se aferraran obstinadamente a la cosmovisión mecanicista hasta que Einstein les enseñara una lección en 1905 (o Planck en 1900). La tendencia no mecanicista más importante se basaba en la teoría electromagnética, pero no sólo era esto una de las señales del deseo general de confrontar la cosmovisión mecanicista y buscar nuevos fundamentos que o bien se opusieran a ella o bien fueran modificaciones radicales de ella. De acuerdo con el modelo del mundo de la mecánica clásica –la versión laplaciana del newtonismo (que no debe confundirse con las propias ideas de Newton)– el mundo consistía en átomos, que eran los lugares donde se daban diversas fuerzas de largo y corto alcance y en donde actuaban éstas. La fuerza gravitatoria era el ejemplo paradigmático de tales fuerzas, actuando a cierta distancia sobre el espacio vacío. Con la llegada de la teoría de campos, la mecánica de la propagación de fuerzas cambió, pero Maxwell y la mayoría de los otros físicos de la teoría de campos continuaron buscando una base mecánica para sus modelos. El desplazamiento conceptual más importante fue quizá el surgimiento –de hecho, la necesidad– de un *éter* universal como el casi hipotético medio continuo que inunda todo a través del cual las fuerzas se propagan a velocidad finita.

En 1902, en la parte final de un libro de texto sobre óptica, Michelson declaró que creía que «no parece lejano el día en el que las líneas convergentes de muchas regiones de pensamiento aparentemente lejanas se encuentren en [...] terreno común». Y continuó, «entonces la naturaleza de los átomos y las fuerzas involucradas en su unión química; las interacciones entre estos átomos [...] como se manifiestan en el fenómeno de la luz y la electricidad; la estructura de las moléculas y los sistemas de moléculas de los cuales los átomos son las unidades; la explicación de la cohesión, elasticidad y gravedad: todo esto será clasificado dentro de un solo cuerpo compacto y consistente de conocimiento científico» (Michelson 1902, p. 163). Y éste era el mismo Michelson que, ocho años atrás, había sugerido que la física estaba cercana a su fin. ¿Fueron los descubrimientos del electrón y la radiactividad los que causaron su cambio de actitud? ¿O fue quizá el descubrimiento de Planck de la ley de la radiación, basada en la noción de la cuantización de la energía? Nada de eso; estos recientes descubrimientos no se mencionaban en el libro. El entusiasmo de Michelson tenía su raíz en «una de las más gran-

> can, todos los fenómenos físicos serán una rama de la matemática pura (*Informe del BAAS 1895*, p. 595).

Como veremos, parecidos puntos de vista siguieron desempeñando un papel importante a lo largo del siglo XX. A pesar de que muchos de los contemporáneos de Hicks habrían suscrito su filosofía, en 1895 la mayoría de los físicos había abandonado la teoría de vórtices de los átomos. Décadas de trabajo teórico no habían llevado a un progreso real y el gran programa de los vórtices estaba degenerando en matemáticas estériles.

Algo muy parecido se puede decir de otra teoría atómica hidrodinámica, la teoría del «chorro de éter», desarrollada por el matemático Karl Pearson en los años 1880-1890. De acuerdo con esta teoría, el átomo definitivo era un punto en el éter a partir del cual el nuevo éter fluía de manera continua en todas las direcciones del espacio. Como los teóricos de vórtices, Pearson aplicaba su teoría a una serie de problemas, y creía que sería capaz de explicar –en principio– la gravitación, el electromagnetismo y los fenómenos químicos. A pesar de que la teoría de Pearson no suscitó el mismo interés que la teoría de vórtices, merece la pena mencionarla porque incluía, no sólo las fuentes, sino también los sumideros del éter; esto es, una especie de *materia negativa*. Gravitatoriamente, la materia «negativa», que repele la materia ordinaria pero atrae otra materia negativa, había sido debatida previamente en los años 1880 por Hicks, enmarcada en la teoría atómica de vórtices, y el extraño concepto reapareció en la teoría de Pearson, así como en otros debates de la física finisecular. Por ejemplo, el físico británico Arthur Schuster especuló de manera algo ligera que podrían existir sistemas estelares enteros de antimateria, indistinguibles del nuestro a excepción de que dos sistemas estelares se repelerían entre sí en lugar de atraerse. No sólo introdujo los nombres «antimateria» y «antiátomos» en 1898, sino que también sugirió que la materia y la antimateria se aniquilarían una a la otra al colisionar, anticipando por tanto un importante concepto de la física cuántica posterior.

En la versión de antimateria de Pearson, el éter entraba por un chorro y desaparecía de nuestro mundo por un sumidero. ¿De dónde venía el éter en primer lugar? Según Pearson escribió en 1892, no aparecería simplemente de la nada, sino que probablemente vendría de una cuarta dimensión a la que volvería de nuevo. Aquí tenemos otro concepto que normalmente se observa como un invento de la teoría de la relatividad del siglo XX, apareciendo de manera inesperada en la física de la cosmovisión antigua. En realidad, las ideas de hiperespacios y su posible significado en la física no eran nuevas en los años 1890. En 1870, el matemático británico William Kingdon Clifford utilizó el concepto debido a Riemann de geometría curva no euclídea para sugerir que el movimiento de la materia y el éter era en realidad la manifestación de una variación de la curvatura del espacio. Esta idea general de una «geometrización de la física» era bien conocida a finales del siglo XIX e inspiró a varios físicos, astrónomos y matemáticos, por no mencionar a escritores de ciencia-ficción como H. G. Wells. Por ejemplo, en 1888, el eminente astrónomo estadounidense Simon Newcomb propuso un modelo del éter basado en el espacio hiperdimensional, y en 1900 el alemán Karl Schwartzschild utilizó ex-

sicos, incluyendo a Pierre Duhem en Francia, argumentaban que la creencia en átomos y moléculas era metafísica y que todos los fenómenos empíricos se podían explicar sin la hipótesis atómica.

El programa de la energética se consideró un reto al punto de vista tradicional mecánico-molecular lo bastante grande como para que se adoptara como tema de discusión en el encuentro anual de la Asociación Alemana de Científicos Naturales y Físicos en Lübeck, 1895. El encuentro contó con una famosa discusión entre Boltzmann, que atacó a los energeticistas, y Helm y Ostwald, que argumentaron contra la visión mecanicista del mundo. Es interesante notar que ni Boltzmann ni los otros presentes en el encuentro simplemente defendieran la cosmovisión mecánico-clásica o suscribieran de lleno el punto de vista que Helm y Ostwald criticaban. Boltzmann declaró que la cosmovisión mecanicista estaba en vía muerta y que la «visión de que ninguna otra explicación puede existir excepto la del movimiento de los puntos materiales, las leyes de los cuales vienen determinadas por fuerzas centrales, ha sido generalmente abandonada mucho antes de los comentarios del señor Ostwald» (Jungnickel y McCormmach 1986, p. 222). En cualquier caso, Boltzmann no veía ningún mérito en el programa de los energeticistas y prefirió trabajar sobre una base mecánica, sintiendo que por sí sola estaba lo suficientemente desarrollada como para asegurar el progreso científico.

La alternativa energética recibió un apoyo sólo modesto entre físicos y químicos, pero la crítica de la teoría atómica y el énfasis en lo fundamental del concepto de energía se repitieron también por parte de muchos científicos no directamente asociados con el programa de la energética. El principal físico francés, Pierre Curie (quizá más conocido como el marido de Marie Curie) podría ser un ejemplo. De acuerdo con su punto de vista positivista de la ciencia, Curie se apartaba de las hipótesis materialistas y atómicas y favorecía un fenomenalismo inspirado en las leyes de la termodinámica. Él y algunos otros físicos franceses mantenían que la termodinámica era el ideal de teoría física. Sostenían que la energía, no la materia, era la esencia de una realidad que sólo podría ser entendida como procesos o acciones. Desde el principio de la década de 1880 en adelante, el físico-filósofo austriaco Ernst Mach defendía una interpretación fenomenológica de la física, de acuerdo a la cual las teorías y conceptos físicos eran maneras económicas de organizar datos sensoriales. Mach admitía la utilidad de la mecánica molecular, pero no la consideraba una teoría fundamental ni que expresara la realidad física. Desde un punto de vista fundamental, él prefería los principios energeticistas a las leyes de la mecánica. De nuevo de acuerdo con Ostwald y sus aliados, Mach mantenía que los átomos no eran sino ficciones convenientes. Además Mach criticaba el corazón mismo de la mecánica, la idea de fuerza expresada mediante la segunda ley de Newton. Heinrich Hertz emprendió una crítica fundamental de la mecánica en cierto modo similar, desde un punto de vista positivista, y apoyándose sólo en las concepciones fundamentales de espacio, tiempo y masa. Sin embargo este tipo de análisis crítico de la mecánica no involucraba necesariamente un deseo de abandonar la cosmovisión mecánica. Sí era así en el caso de Mach, pero para Hertz las nuevas versiones de la mecánica simplemente afirmaban esta cosmovisión. De hecho, una de las

principales metas de la mecánica libre de fuerzas de Hertz era establecer una teoría mecánica del éter electromagnético.

La cosmovisión mecánica se consideraba estancada en la década de 1890, y hasta los tradicionalistas tenían que admitir que no disfrutaba de un éxito universal. Aparte de la turbulenta relación entre la mecánica y la ley de la entropía, había un problema más antiguo relacionado con la teoría cinética de los gases. Tan pronto como en 1860, Maxwell había observado que los cocientes que se medían entre los calores específicos de los gases diatómicos a presión constante (c_p) y a volumen constante (c_v) no estaban de acuerdo con el teorema de equipartición basado en la teoría mecánica. De acuerdo con esta teoría, $\gamma = c_p/c_v = 1 + 2/n$, donde n es el número de grados de libertad de la molécula. El problema era que el resultado que se predecía para gases diatómicos se ajustaba a los experimentos (que proporcionaban $\gamma = 1{,}4$) sólo si se asumía que la molécula era rígida y no tenía partes internas; esta suposición parecía inconsistente con los resultados de la espectroscopía que indicaban claramente vibraciones internas que intercambiaban energía con el éter. El problema se trataba como una anomalía pero por supuesto hacía falta más que una simple anomalía para conmocionar el punto de vista mecánico. Y sin embargo el fallo aparente del teorema de equipartición se consideraba lo bastante serio como para figurar como uno de los dos nubarrones de la famosa conferencia *Nineteenth Century Clouds Over the Dynamical Theory of Heat and Light* (Nubarrones del siglo diecinueve sobre la teoría dinámica del calor y la luz) que Lord Kelvin impartió frente a la Institución Real (Royal Institution) en abril de 1900. La otra amenaza era el fracaso de la explicación del movimiento de la tierra a través del éter según se mostraba en el experimento del flujo del éter de Michelson y Edward Morley. (Sobre esto referimos al capítulo 7.)

La nueva física que surgió durante los primeros años del siglo XX no fue una revolución contra una cosmovisión newtoniana petrificada, algo análoga a la revolución de Galileo contra el aristotelismo. Ya en 1905, la cosmovisión mecanicista había sufrido ataques durante más de una década, y solamente por esta razón nunca hubo demasiado conflicto entre Einstein y Newton. Incluso más importante que la oposición inspirada por la termodinámica y la energética fue la nueva y vigorosa tendencia de la teoría electromagnética que caracterizó la década de 1890. Trataremos con más detalle esta denominada cosmovisión electromagnética en el capítulo 8, y aquí sólo enfatizamos su importancia y sus elementos clave. El problema básico de la física a finales del siglo XIX fue quizá la relación entre éter y materia: ¿era el éter el sustrato fundamental a partir del cual se construye la materia? O, por el contrario, ¿era la materia una categoría ontológica más fundamental de la cual el éter era simplemente un caso particular? El primer punto de vista, en el que se daba la primacía a las estructuras en el éter, se fue volviendo más común en el cambio de siglo, cuando los modelos mecánicos del éter fueron reemplazados por modelos electrodinámicos.

Si el electromagnetismo era más fundamental que la mecánica, tenía sentido intentar derivar las leyes mecánicas de las del electromagnetismo, y esto era precisamente lo que intentaban muchos físicos teóricos. El electromagnetismo se consideraba un principio unificador de toda la ciencia, no muy distinto del papel que se le asignaba a la

energía en la energética de Ostwald. La manera en la que Ostwald y sus aliados energeticistas hablaban de la «materia subordinada a la energía» y de que «todos los sucesos [eran] al final nada más que un cambio en la energía» era sorprendentemente similar a la retórica de los electrodinámicos sólo que con el «éter» o «campo electromagnético» sustituyendo a la «energía». En ambos casos, el materialismo se descartaba y la materia se declaraba un epifenómeno. Joseph Larmor, el eminente teórico británico, no tenía dificultades en imaginar un mundo basado en un éter inmaterial y trascendente. Admitía, como escribió en 1900, que esto podría parecer «dejar la realidad atrás» pero defendía su cosmovisión etérea argumentando que describía una realidad interna que no era directamente accesible a los sentidos (Larmor 1900, p. vi). Éste era un argumento que Mach, Ostwald y otros fenomenalistas no habrían aceptado. Al principio del nuevo siglo, la imagen del mundo monista y electromagnética fue aceptada por una proporción creciente de físicos de vanguardia en Alemania, Inglaterra, Francia y los Estados Unidos. La física consistía en la física de la materia y la física del éter electromagnético y la tendencia a evitar este dualismo no deseado era identificar materia con éter más que al revés. Esto no quiere decir que no hubiera voces disidentes o que la doctrina electromagnética permeara todo el campo de la física. Había físicos que –años antes que Einstein– rechazaban el éter como un concepto metafísico y algunos continuaban buscando modelos mecánicos del éter o incluso consideraban el éter un estado especial de la materia ordinaria. Los libros de texto de este periodo por lo general se fundamentaban en una base mecánica y no reflejaban el cambio de la cosmovisión que se discutía en la física teórica puntera. Así es como son por lo general los libros de texto: por naturaleza conservadores y cautos en su actitud frente a las ideas modernas.

La tendencia en la física teórica alrededor de 1900 era más un desplazamiento en ideas fundamentales desde la mecánica a la termodinámica y la electrodinámica, y era más que el resultado de una serie de descubrimientos espectaculares. Era parte de un cambio en la cosmovisión que tenía ramificaciones fuera de la física y que fue alimentado en parte por el *Zeitgeist* particular del periodo, un espíritu del tiempo a veces caracterizado como neorromántico. El historiador Russell McCormmach resumió con acierto la situación como sigue: «Toda la configuración cultural durante el cambio de siglo estuvo implicada en el cambio del pensamiento mecánico al electromagnético. Los conceptos electromagnéticos inmateriales resultaban atractivos en la misma manera que la imaginería inerte y material de la mecánica resultaba desagradable» (McCormmach 1970, p. 495). Un elemento importante de esta configuración cultural fue un antimaterialismo generalizado. Tomando distintas formas en las distintas naciones científicas, la doctrina antimaterialista consistía en creer que «la materia está muerta». Si la materia no era la realidad última sino tan sólo la manifestación de un éter inmaterial no parecía irracional disputar otras doctrinas establecidas que se derivaban de la física de la materia, incluyendo la permanencia de los elementos químicos y las leyes de la conservación de la materia y la energía. En efecto, en algunas esferas, las mismas cualidades de permanencia y conservación se consideraban sospechosas dentro de una imagen del mundo que enfatizaba la transformación, la evolución, y el devenir.

Como ejemplo, consideremos al psicólogo y físico aficionado francés Gustave LeBon, quien en 1896 anunció el descubrimiento de lo que él mismo denominó «luz negra», un nuevo tipo de radiación invisible que él creía diferente de, pero quizá relacionada con, los rayos X y catódicos. Aunque a la alegación del descubrimiento de LeBon no le fue bien, sus ideas generales de la materia, la radiación y el éter se recibieron favorablemente por parte del público y fueron hasta cierto punto representativas del *Zeitgeist* del periodo en círculos científicos. En su libro *La Evolución de la Materia,* un éxito del cual se imprimieron doce ediciones y se vendieron 44.000 ejemplares, LeBon concluía que toda la materia es inestable y que constantemente emitía radiación o «efluvios». Se sostenía que las cualidades materiales eran epifenómenos que la materia exhibía en el proceso de transformarse en el éter imponderable a partir del cual fuera originada. Según LeBon, no existía dualidad entre energía y materia, que simplemente representaban distintas etapas en un proceso evolutivo, el resultado final del cual era el estado puro etéreo. Entre sus muchos argumentos a favor de la degradación continua de la materia en éter, LeBon consideraba que la radiactividad era particularmente convincente. Compartía el punto de vista de muchos físicos de que la radiactividad es una propiedad que presenta toda la materia. Entonces, si todos los elementos químicos emitían radiaciones etéreas, ¿no se acabarían deshaciendo y no probaría esto lo inmaterial de la materia? O como LeBon expresó bastante más drásticamente, ¿no representaría el éter «el nirvana final hacia el cual todas las cosas retornan después de una existencia más o menos efímera?» (LeBon 1905, p. 315). LeBon y muchos de sus contemporáneos creían que, de hecho, éste era el caso.

Las especulaciones cuasicientíficas de LeBon tenían un atractivo considerable para los muchos científicos que no estaban satisfechos con los ideales positivistas y ansiaban una ciencia no dogmática y más juvenil que satisficiera lo que ellos asociaban con el espíritu humano. Sus ideas tocaron un punto sensible en un periodo que ha sido descrito como «una revolución contra el positivismo» e incluso –pero con menos justificación– «una revolución contra la razón» (MacLeod 1982, p. 3). Entre los simpatizantes de los argumentos de LeBon estaba el gran Henri Poincaré. Pero LeBon no era un físico teórico y sus puntos de vista, aunque de moda, no eran particularmente modernos. Si los físicos de fuera de Francia no le tomaban demasiado en serio, pudo haber sido porque no incorporó al éter electromagnético en sus especulaciones. Aunque es razonable hablar de un espíritu general de la física alrededor del final de siglo, el grado de consenso no debería exagerarse. Había diferencias considerables entre los puntos de vista de los físicos principales y también existían importantes diferencias nacionales. En Alemania y Francia, por ejemplo, la reacción contra la cosmovisión mecanicista se asociaba con las virtudes positivistas e ideales termodinámicos más a menudo que en Inglaterra. Los físicos británicos por lo general no mostraban simpatía por el punto de vista de la ciencia positivista y orientado a los hechos que defendían Pierre Curie, Duhem, Ostwald, Mach y otros. En 1896, en un comentario crítico a la energética de Ostwald, el físico irlandés George FitzGerald distinguía entre el estilo británico metafísicamente receptivo y el estilo alemán inductivo y poco filosófico. «Un británico quie-

re emoción», escribió, «algo que suscite entusiasmo, algo con interés humano» (Wynne 1979, p. 171). El grito de guerra pidiendo emociones, acciones y procesos evolutivos «con interés humano» se repetiría en los neorrománticos franceses que contrastaban su estilo con el de los alemanes, supuestamente poco imaginativos. Al mismo tiempo, se oponían al estilo británico de física, que encontraban demasiado mecanicista y con falta de *esprit*.

CAPÍTULO 2

El mundo de la física

Personal y recursos

¿Quiénes eran los físicos sobre 1900? ¿Cuántos había y cómo estaban distribuidos según naciones e instituciones? ¿En qué tipo de física trabajaban? ¿Quién los financiaba? Examinemos primero el número de físicos, es decir, de la gente que contribuía al avance de la física bien directamente, como los investigadores, bien indirectamente, como los profesores. No se sabe demasiado sobre el entorno social de los físicos alrededor del cambio de siglo, pero un estudio sobre los físicos alemanes mostró que el físico joven alemán típico provenía de los estratos sociales más altos, las clases media y alta. Él –y siempre era «él»– era socialmente indistinguible del académico humanista joven. Los químicos en cambio –y en particular, los químicos orgánicos– procedían más frecuentemente de la comunidad de negocios (tabla 2.1). La diferencia probablemente reflejaba la conexión cercana entre química e industria alemana, una conexión que todavía no era fuerte en lo tocante a la física.

El significado del término «físico» ha cambiado, por supuesto, con el tiempo, pero en 1900 el significado de la palabra no difería demasiado del actual; la física había alcanzado por aquel entonces un nivel profesional que presentaba más similitudes con lo que llegaría a ser en 1990 que con lo que había sido en 1810. La gran mayoría de los físicos, es decir, aquellos que contribuían a la literatura de investigación física, eran profesionales en el sentido de que se ganaban la vida como miembros académicos de institutos físicos en universidades o escuelas politécnicas (como las *Technische Hochschulen* en Alemania). Aficionados con talento, profesores de secundaria, e individuos adinerados todavía tenían un cierto papel, pero era pequeño y disminuía rápidamente. Un gran número de ingenieros y expertos técnicos se ocupaban de la física aplicada (industrial y médica, por ejemplo) y podrían ser clasificados razonablemente como físicos también. De todos modos nos limitaremos a aquellos que ocupaban puestos de enseñanza explícitamente dedicados a la física, los físicos llamados académicos. Como sucede generalmente con la ciencia, la física era un fenómeno casi exclusivamente

TABLA 2.1.
Contexto social de los científicos doctorados alemanes

Campo	*Año*	*N.º de doctorados*	*Clases profesionales medias y altas (%)*	*Comunidad de negocios (%)*	*Agricultura (%)*
Física	1899	56	52	36	9
	1913	68	53	40	7
Matemáticas	1899	19	53	39	16
y astronomía	1913	8	50	50	0
Química	1899	99	25	66	8
orgánica	1913	99	33	57	10
Química	1899	77	29	61	10
inorgánica	1913	42	40	45	14
Humanidades	1899	64	50	44	6
	1913	441	50	38	4

Nota: Los datos para el año 1899 son la media de 1896-1902. Datos basados en Pyenson 1979.

TABLA 2.2.
Físicos académicos alrededor de 1900

Miembros facultativos y asistentes	*Nº de físicos, por millón*		*Gastos (en miles de marcos), por físico*		*Productividad total (anual), por físico*	
Austria-Hungría	64	1,5	560	8,8		
Bélgica	15	2,3	150	10		
Reino Unido	114	2,9	1.650	14,5	290	2,2
Francia	105	2,8	1.105	10,5	260	2,5
Alemania	145	2,9	1.490	10,3	460	3,2
Italia	63	1,8	520	8,3	90	1,4
Japón	8	0,2				
Países Bajos	21	4,1	205	9,8	55	2,6
Rusia	35	0,3	300	8,5		
Escandinavia	29	2,3	245	8,5		
Suiza	27	8,1	220	8,2		
Estados Unidos	215	2,8	2.990	14,0	240	1,1

Nota: El equivalente de 1.000 marcos en 1900 era de aproximadamente 240 dólares. Datos resumidos de Forman, Heilbron y Weart 1975.

europeo-estadounidense, a pesar del auge de Japón y del trabajo que se llevaba a cabo en las colonias inglesas, alemanas, holandesas y otras (mayoritariamente por blancos).

Queda claro a partir de la tabla 2.2 que, en primer lugar, la física en 1900 era un pañuelo. El número total de físicos académicos en el mundo estaba probablemente entre 1.200 y 1.500. (En comparación, en 1900, el número de miembros en las sociedades nacionales químicas de Inglaterra, Alemania y Francia, superaba los 3.500.) Además este pañuelo estaba dominado por unos pocos países, de los cuales Gran Bretaña, Francia, Alemania y los Estados Unidos eran con mucho los más importantes; su número total de unos 600 físicos representaba casi la mitad de la población mundial de físicos. En segundo lugar en la jerarquía estaban países como Italia, Rusia y el Imperio austrohúngaro; y después, en un tercer grupo, naciones más pequeñas como Bélgica, Holanda, Suiza y los países escandinavos. Hay que destacar que en 1900 los Estados Unidos ya contaban con más físicos que cualquier otro país, y que la densidad de físicos entre los «cuatro grandes» era la misma (sobre 2,9 por millón de habitantes) y considerablemente menos que en Suiza y Países Bajos. Aunque Estados Unidos lideraba cuantitativamente la física, estaba muy por detrás de las tres potencias europeas en cuanto a productividad e investigación original. Esto se debía en parte al clima en las principales universidades americanas que era todavía ajeno –de hecho a veces hostil– a los ideales alemanes de investigación y pertenencia al mundo académico como elementos esenciales de la carrera de profesores de universidad. En 1889, el presidente del Massachusetts Institute of Technology (MIT) declaró que «nuestro objetivo debe ser: *la mente del estudiante*, no el descubrimiento científico, no el logro profesional», un punto de vista que difícilmente podía llevar a muchos descubrimientos científicos (Kevles 1987, p. 34).

Diez años después, en los umbrales del siglo XX, Henry Rowland dio un discurso ante la recién formada Sociedad Americana de Física (American Physical Society). Firme partidario de la ciencia pura, Rowland compartía el ideal alemán de la física como cultura e investigación libre. «Formamos un pequeño y único cuerpo de hombres, una nueva variedad de la raza humana», dijo Rowland a su audiencia. El nuevo cuerpo era «una aristocracia no de riqueza, no de pedigrí, sino de intelecto e ideales, la cual mantiene en la más alta estima a aquel que más aumenta nuestro conocimiento o a quien lucha por él como el más alto bien». Rowland sabía muy bien que muchos de sus compatriotas no compartían su punto de vista. Deploraba que «gran parte del intelecto de este país todavía se desperdicia en la actividad de la llamada ciencia práctica, la cual atiende a nuestras necesidades físicas, [mientras que] tan sólo poca atención y poco dinero se destina a la mayor parte del asunto, que atrae tan sólo a nuestro intelecto» (Rowland, 1902, p. 668). En tiempos del discurso de Rowland, las cosas estaban cambiando rápidamente y la física estadounidense estaba en camino de convertirse en un factor principal dentro de la física mundial. En 1893 apareció el primer número de *Physical Review*, en 1899 se fundó la Sociedad Americana de Física y dos años después el Congreso autorizó 250.000 dólares para construir la *National Bureau of Standards*. En este mismo año, Andrew Carnegie proporcionó la enorme suma de 10 millones de dólares para fundar una institución que estimulara la investigación básica. El resulta-

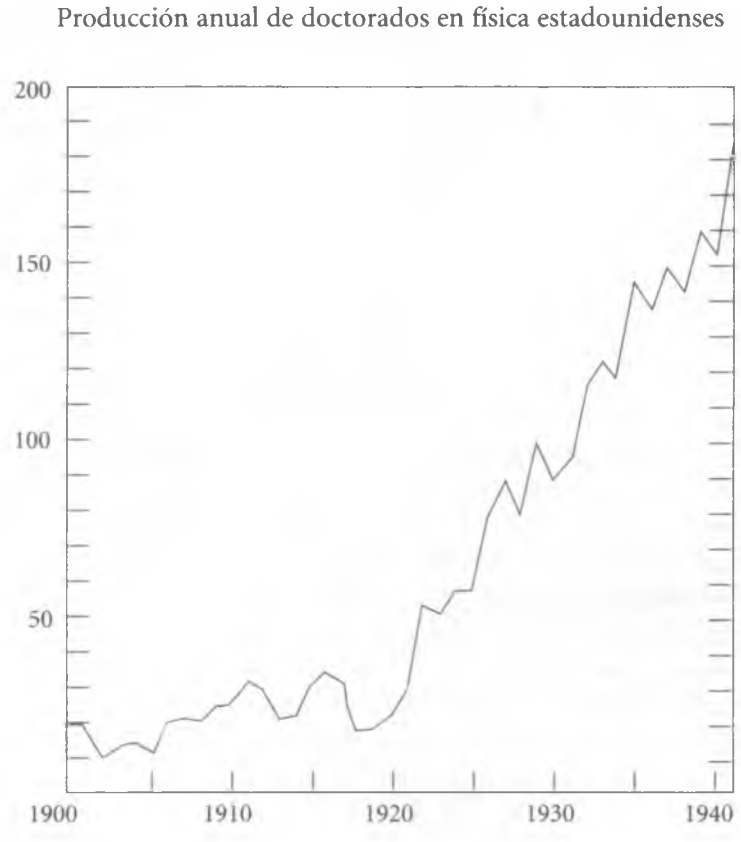


Gráfico 2.1. El auge de la física en los Estados Unidos, como muestra el número de físicos estadounidenses que obtuvieron el doctorado en física entre 1900 y 1940. *Fuente:* Weart 1979a, 296; N. Reingold (ed.), *The Sciences in the American Context: New Perspectives*. Smithsonian Institution Press, derechos reservados 1979. Usado con permiso del editor.

do, la Carnegie Institution, tuvo un efecto estimulante en la investigación en las universidades estadounidenses.

El número de miembros de la Sociedad Americana de Física indica el crecimiento de la profesión de físico en los Estados Unidos. De menos de un centenar de miembros en 1899, diez años después el número se había incrementado a 495. En 1914 superó los 700, y durante la siguiente década la tasa de crecimiento fue incluso más elevada (véase figura 2.1). Sobre 1910, la física estadounidense estaba abandonando la sombra de Europa, a pesar de que el país todavía era débil en física teórica y de que la mayoría de las contribuciones que aparecían en *Physical Review* no alcanzaban la calidad de revistas *Annalen der Physik* o *Philosophical Magazine*. A pesar de físicos eminentes como Robert Wood, Albert Michelson, Robert Millikan y Gilbert Lewis, la física estadounidense era todavía relativamente provinciana y dependiente de lo que sucedía en Europa. Ludwig Boltzmann visitó la Universidad de California, Berkeley, en 1905. Encontró la naturaleza bella y las mujeres robustas, pero se quedó menos impresionado del ni-

TABLA 2.3
Distribución de campos de estudio de artículos invitados en la Conferencia de París de 1900

Campos de estudio	*Número*	*Porcentaje*
Electricidad y magnetismo	22	24
Física mecánica y molecular	19	20
Cuestiones generales; medidas y unidades	15	16
Óptica y termodinámica	14	15
Física cósmica	9	10
Magneto-óptica, rayos catódicos, rayos de uranio	8	9
Física biológica	5	6

del siglo XX (véase tabla 2.4). Entre 1890 y 1914 se construyeron 22 nuevos laboratorios de física en Alemania, 19 en el Imperio británico, 13 en los Estados Unidos y 12 en Francia. Aunque fue Alemania la que erigió más instituciones, las inversiones británicas y estadounidenses fueron sustancialmente mayores. Mientras que Alemania invirtió un total de 10.300 marcos por físico y año, las inversiones estadounidenses fueron el equivalente a 14.000 marcos y las británicas, a 15.500. Por supuesto esto son promedios, y existían grandes variaciones de físico a físico y de instituto a instituto, con los experimentales mucho más caros de mantener que los teóricos. Por ejemplo, mientras

TABLA 2.4.
Institutos de física y facultades

	Nº de institutos	*Facultades, 1900*	*Facultades, 1910*
Austria-Hungría	18	48	59
Bélgica	4	9	10
Reino Unido	25	87	106
Imperio británico, otros	7	10	13
Francia	19	54	58
Alemania	30	103	139
Italia	16	43	51
Japón	2	6	17
Países Bajos	4	10	13
Escandinavia	7	18	26
Suiza	8	17	23
Estados Unidos	21	100	169

Nota: Basado en datos de Forman, Heilbron y Weart 1975.

que el instituto de física de la Universidad de Berlín recibía 26.164 marcos en 1909, el pequeño instituto de Planck para física teórica tenía que apañárselas con un presupuesto de 700 marcos.

El auge en las instalaciones físicas estaba muy relacionado con el marcado cambio hacia la investigación como la principal función de la educación superior, que tenía sus raíces en Alemania y fue completamente aceptada en la mayoría de otros países sólo hacia 1900. Por aquel entonces, el estudiante de investigación se convirtió en una figura central en cualquier institución física con significación, y con la llegada de estudiantes de investigación surgió la necesidad de más espacio de laboratorio. Los datos de la Universidad de Leipzig son reveladores: cuando el instituto de física se construyó en 1835, el 12 por 100 del área se planeó para el uso de laboratorio; en 1873 el instituto se expandió por un factor de 4, y el espacio de laboratorio se incrementó al 46 por 100; otra expansión, en 1904, y por un factor de 3, resultó en un 60 por 100 para laboratorios y despachos para estudiantes de doctorado. Así pues, durante un periodo de 70 años, el espacio para la investigación se había incrementado unas 60 veces. El trabajo de investigación como parte de los estudios de doctorado se remonta al laboratorio de química de Justus Liebig en Giessen, en la década de 1830, y se institucionalizó en física en muchas universidades alemanas entre 1870 y 1890. Pero no era una medida evidente por sí misma, incluso en las principales universidades alemanas. El instituto de física de la Universidad de Tubinga se erigió al final de la década de 1880, y por aquel entonces «no se esperaba que los estudiantes del instituto llevaran a cabo investigaciones científicas independientes», como Friedrich Paschen relataba en 1906, añadiendo que «a este respecto, la situación se ha alterado esencialmente en los últimos 10 años» (Forman, Heilbron y Weart 1975, p. 103).

Hasta aproximadamente 1890, en los Estados Unidos y muchos otros países ni siquiera se esperaba que los profesores llevaran a cabo investigaciones científicas independientes. El laboratorio físico Jefferson de la Universidad de Harvard se completó en 1884. Albergaba laboratorios y una gran aula, y su objetivo era tanto la enseñanza como la investigación. John Trowbridge, el director del laboratorio de 1888 a 1910, tenía bien presente que iba siendo hora de seguir la tradición alemana en la física. En 1884 advirtió contra «el sistema de clases o recitaciones no apoyado por trabajo de laboratorio» todavía tan corriente, e inició cursos basados en el laboratorio para los cuales el nuevo laboratorio venía perfecto. Doce años después, Trowbridge podía mirar atrás sobre un periodo de cambios tanto en la docencia como en la investigación: «Hoy en día se espera una cierta cantidad de trabajo original de [el profesor de física en Harvard]. Durante los últimos diez años se ha hecho más investigación original en la Universidad de Harvard que en los 200 años previos» (Aronovitch 1989, pp. 95 y 99).

Publicaciones de física

¿Qué se obtuvo entonces de las inversiones en física? Los físicos, como otros científicos, producen artículos; el número de artículos de investigación es la medida más di-

recta de la productividad científica. Hasta 1900 las publicaciones periódicas de física existían más o menos en el mismo formato que hoy, pero por supuesto en menor número y mucho menos especializadas. Aunque la mayor y más sustancial parte de la investigación física se publicaba en revistas especiales de física, también hubo muchos artículos que aparecían en revistas o anuarios que además cubrían otras disciplinas. Por ejemplo, *Comptes Rendus*, publicada por la Academia de Ciencias en París, los *Göttingen Nachrichten* publicada por la Sociedad Científica de Gotinga y los *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*. Muchos países contaban con revistas locales dedicadas a la física, generalmente escritas en el lenguaje local y a menudo publicadas por la sociedad de física local, pero raras veces aparecían artículos de investigación con significación internacional en revistas de países más pequeños. Estos artículos generalmente se incluían en las principales revistas de física de las grandes naciones occidentales que eran *Philosophical Magazine* (Inglaterra), *Journal de Physique* (Francia), *Annalen der Physik* (Alemania), *Nuovo Cimento* (Italia) y *Physical Review* (Estados Unidos). La tabla 2.5 proporciona el número de artículos de física en 1900 y muestra que Alemania iba claramente por delante de los otros países tanto en producción de artículos como en productividad por físico.

La fuerte posición de Alemania en física, tanto cuantitativa como cualitativamente, era incuestionable. En lo tocante a la calidad, o lo que los historiadores venideros de la ciencia han juzgado como importantes contribuciones a la física, el fidedigno *Dictionary of Scientific Bibliography* lista 197 físicos que tenían más de 20 años en 1900. De ellos, 52 eran alemanes y 6 austriacos. Las nacionalidades de los otros físicos en cabeza que se incluyen en el *Dictionary* son: Gran Bretaña con 35, Francia con 34, Estados Unidos con 27, Rusia con 9, Holanda e Italia ambos con 7 y Suecia con 5. Ésta es básicamente la misma lista que aparece en otras evaluaciones. En su mayor parte, la investigación física de alta calidad se concentraba en las cuatro potencias económicas y políticas del mundo. Éstas contaban con el 75 por 100 de los físicos importantes históricamente del periodo. Si Austria-Hungría, Holanda y Escandinavia se incluyen

TABLA 2.5
Revistas de física en 1900

País	*Principal revista de física*	*Artículos, 1900*	*Porcentaje*	*Productividad*
Gran Bretaña	*Philosophical Magazine*	420	19	2,2
Francia	*Journal de Physique*	360	18	2,5
Alemania	*Annalen der Physik*	580	29	3,2
Italia	*Nuovo Cimento*	120	6	1,4
Estados Unidos	*Physical Review*	240	12	1,1
Todos los demás	–	280	14	–

Nota: La última columna muestra el número medio de artículos por físico académico.

en un grupo germánico, los números son 86 por 100 para los «cuatro grandes» y 38 por 100 para el bloque germánico. Los datos de los premios Nobel cuentan aproximadamente la misma historia. De los veinte ganadores entre 1901 y 1914, dieciséis eran de los cuatro grandes (aunque sólo uno estadounidense), y también lo eran el 77 por 100 de los candidatos propuestos.

La revista principal de física en la primera década del siglo XX era probablemente *Annalen der Physik*, aunque en el mundo angloparlante tenía como rival a la *Philosophical Magazine*. *Annalen* se remontaba a 1799, cuando su nombre era *Annalen der Physik und Chemie*, pero cuando Paul Drude se convirtió en editor en 1900 se eliminó el «Chemie»; ya había suficientes revistas de química y física-química, y hacía tiempo que *Annalen* había empezado a concentrarse en la física pura. Tras la muerte de Drude en 1906, Wilhelm Wien se convirtió en editor, mientras que Planck continuó siendo coeditor y responsable de física teórica. Dado que *Annalen* era una revista alemana, naturalmente la gran mayoría de los autores eran alemanes, pero también había muchas contribuciones de físicos austriacos, escandinavos y holandeses. *Annalen* era una revista prestigiosa para la investigación pura y casi todos sus artículos provenían de físicos universitarios o físicos de los principales laboratorios, como el Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Instituto Imperial de Física y Tecnología) de Berlín.

A pesar de lo prestigioso de *Annalen*, no era sin embargo especialmente difícil conseguir publicar en él. La revista incluía un gran número de artículos aburridos e insignificantes, a menudo disertaciones doctorales experimentales apenas abreviadas. En drástico contraste con las prácticas editoriales posteriores, en 1906 la tasa de rechazo, de acuerdo con la estimación de Planck, era sólo del 5 al 10 por 100 de los artículos enviados. El crecimiento en física se reflejaba en la expansión gradual de *Annalen*, que incrementó sus números anuales de doce en 1900 a dieciséis en 1912. Además de la revista, donde se publicaba investigación completa en artículos que a menudo eran muy largos, se publicaba como secuela una revista con resúmenes, la *Beiblätter zu der Annalen der Physik*. Es bien sabido que la característica de la literatura física, y de la cien-

TABLA 2.6
Publicaciones sobre espectroscopía, 1890-1910

	1890	*1895*	*1900*	*1905*	*1910*
Alemania	81	105	167	144	171
Inglaterra	52	60	62	73	69
Francia	32	41	42	74	53
Estados Unidos	31	37	44	70	67
Italia	5	11	11	13	11
Otros	17	33	39	42	41
Total	218	287	365	416	412

Fuente: Kayser 1938.

tífica en general, es un crecimiento exponencial. Sin embargo, hay motivos para creer que esta tan discutida «ley» de crecimiento exponencial es válida sólo para la ciencia a partir de 1920. En lo concerniente a la física, el número de artículos revisados en las principales revistas de resúmenes era aproximadamente constante durante el periodo 1900-1910. Las *Beiblätter* de 1900 revisaban 2.469 artículos en sus 1.358 páginas; diez años después, la revista incluía 2.984 artículos en sus 1.312 páginas. El número de artículos que aparecían en *Fortschritte der Physik* fluctuaba de manera similar entre 1.872 y 2.825 durante este periodo. No había ningún síntoma de crecimiento sistemático, exponencial o de otro tipo.

Durante la primera década del siglo, los *Annalen* se fueron orientando hacia el tipo de física teórica que Planck quería fomentar. Aparecieron muchos artículos sobre teoría electrónica, relatividad, teoría cuántica, termodinámica y teorías de la gravedad. Durante dos décadas, la revista fue el emblema de las nuevas tendencias en física teórica. Estas tendencias se reflejaban también en el bisemanal *Physikalische Zeitschrift,* que se empezó a publicar en 1899 y especializado en artículos más cortos. Sin embargo, esta revista no llegaba a tener la calidad de los *Annalen* y era utilizada frecuentemente por autores cuyos manuscritos habían sido declinados por Planck y Wien. Otra nueva revista alemana de física era el *Jahrbuch für Radioactivität und Elektronik,* fundada en 1904 y editada por Johannes Stark. Como se indica en su nombre, el *Jahrbuch* se especializaba en la física con origen en los grandes descubrimientos de la década de 1890, especialmente la radiactividad, los rayos X y la física electrónica. (*Elektronik* o «electrónica» significaba entonces la física del electrón y todavía no había adquirido el significado de ingeniería posterior.) El *Jahrbuch* de Stark estaba dedicado casi en su totalidad a temas experimentales y no incluía teorías electromagnéticas del electrón o similares en su definición de «electrónica».

Si es que cabe hablar de un campo y una técnica física que caracterizase toda la disciplina, quizá un buen candidato sería la espectroscopía: ésta, tanto la experimental como la teórica, era en muchos sentidos el campo puntero de la física, y continuó ocupando una posición sobresaliente durante dos décadas. Los artículos sobre espectroscopía, clasificados bajo las entradas «espectros» y «efecto Zeeman», componían el 3,2 por 100 de todos los artículos resumidos en *Science Abstracts* en 1898. En 1908 el número se había incrementado hasta el 6,2 por 100. El espectroscopista Heinrich Kayser se jactaba de poseer una colección completa de artículos en su área de investigación. En 1938 el físico de 85 años publicó un estudio estadístico sobre el desarrollo de la espectroscopía (tabla 2.6). Los datos no sólo muestran una imagen del desarrollo de la espectroscopía, sino que también proporcionan una cruda indicación de la distribución de la física en distintas naciones en el periodo de 1890 a 1910.

Una mirada japonesa a la física europea

La física prácticamente no existía en Japón antes de 1870; incluso en el cambio de siglo, los institutos de investigación científica eran pocos y mal equipados. La física se ense-

ñaba en la Universidad de Tokio, fundada en 1877, pero se daba una prioridad muy baja a la investigación. «No había partidas en el presupuesto universitario para la investigación», recordaba un físico de las condiciones en los primeros años del nuevo siglo. «En la facultad de ciencias de la Universidad de Tokio de aquellos días, el presupuesto operativo era de sólo unos 5.000 yenes (sobre 2.500 dólares) para física y 4.000 yenes para química. Esto apenas era suficiente para cubrir los instrumentos, compuestos químicos, libros, revistas, muestras, carbón, gas y electricidad que se necesitaban para enseñar a los estudiantes, y mucho menos para realizar investigación» (Nakayama, Swain y Yagi 1974, p. 166).

Hantaro Nagaoka (de quien hablaremos más en el capítulo 4) fue uno de los pioneros de la física japonesa. Se licenció por la nueva Universidad de Tokio en 1887 y de 1893 a 1896 se embarcó en un viaje profesional por Europa, continuando sus estudios en las universidades de Múnich, Berlín y Viena. En julio de 1910, siendo entonces profesor de la Universidad Imperial de Tokio (que era como se había rebautizado a la Universidad de Tokio) y el principal físico de Japón, partió de nuevo hacia Europa en un viaje profesional. Asistió a congresos internacionales, visitó varios de los más eminentes institutos de física, rindió homenaje a los héroes de la física (muertos o vivos) y estableció contactos con importantes físicos. Lo que Nagaoka vio en su viaje y narró en sus cartas es una muestra bastante representativa de lo que sucedía entre los principales físicos europeos; y por aquel entonces la física era todavía, en gran medida, equivalente a la física europea. Como investigador activo en los aspectos de la física tanto experimentales como teóricos (y competente en francés, alemán e inglés), Nagaoka estaba bien cualificado para dar una narración fiable sobre el estado de la física en Europa, y quizá más objetivamente que las narraciones de los propios europeos. En una carta de noviembre de 1910 al físico italiano Augusto Righi, un experimental que trabajaba en electricidad y óptica, Nagaoka mencionaba que él había ido de Bolonia (donde había estado con Righi) a Roma, y de allí a Ginebra, Zurich, Múnich y Berlín. Éstas son algunas de sus impresiones:

> En el laboratorio del Prof. Weiss en Zurich se están llevando a cabo muchos interesantes trabajos sobre magnetismo; allí he visto un electroimán proporcionar más de 80.000 gauss. En Múnich, Ebert está trabajando en proyectos conectados con la electricidad atmosférica y se están realizando varias investigaciones interesantes en el laboratorio de Röntgen y en el Instituto de Física Teórica bajo la dirección de Sommerfeld. El Technische Hochschule de Múnich tiene también un instituto de física técnica, donde se investiga el efecto Joule-Kelvin en el escape de gases a través de válvulas porosas, y se ha examinado ya el calor específico del vapor bajo alta presión y temperatura, en conexión con la significación [*sic*] del uso de las turbinas de vapor. El único punto de diferencia con un laboratorio físico ordinario parece ser el uso de máquinas de gran potencia, y en la cooperación de ingenieros mecánicos con los físicos. (Carazza y Kragh, 1991, p. 39)

En la misma carta, Nagaoka lamentaba la falta de interés que los físicos europeos habían mostrado ante su teoría atómica de 1904 (véase capítulo 4) y daba a entender

que este desprecio era el resultado de la posición dominante de J. J. Thomson como autoridad en teoría atómica. «El importante nombre del eminente físico inglés me pareció lo suficientemente pesado para suprimir el trabajo de un físico oriental», se quejaba. Nagaoka era siempre agudamente consciente de ser un oriental en un campo dominado por blancos, y luchó duramente por demostrar que la ciencia japonesa no era necesariamente inferior a la de Occidente. En una carta de 1888 escribió, «no hay motivo por el cual los blancos deban ser tan superiores en todo y [...] espero que seamos capaces de superar a esos *yattya hottya* [pomposos] en unos 10 ó 20 años» (Koizumi, 1975, p. 87). Para la nueva generación de científicos japoneses, la rivalidad científica no podía separarse del todo de la rivalidad racial.

El ocupado viajero japonés también visitó a Ernest Rutherford en Manchester, a Heike Kamerlingh Onnes en Leiden, a Pieter Zeeman en Amsterdam y a Édouard Sarasin en Ginebra; y en Alemania añadió a Múnich y Berlín las universidades o politécnicas de Bonn, Estrasburgo, Aquisgrán, Heidelberg, Würzburg, Karlsruhe, Leipzig, Gotinga y Breslau. Relató detalles de muchas instituciones a Rutherford. Estaba impresionado con el laboratorio de bajas temperaturas de Kamerlingh Onnes y especuló sobre si la desintegración radiactiva permanecería inalterada a los pocos grados por encima del cero absoluto que se podían obtener allí. En Amsterdam, Nagaoka «vio a Zeeman investigando el efecto que lleva su nombre» y en Leiden escuchó a Hendrik Lorentz «discutiendo el curioso resultado de [Felix] Ehrenhaft sobre la carga de los electrones», es decir, la existencia de sub-electrones; cuando visitó el instituto de física en Berlín, «[Erich] Regener estaba repitiendo el experimento de Ehrenhaft y anunció que el resultado era completamente erróneo». Es obvio a partir de la narración de Nagaoka que él consideraba a Alemania la nación puntera en física. Describió el instituto radiológico de Philipp Lenard en la Universidad de Heidelberg como «quizá uno de los más activos de Alemania» y añadió que «el profesor Lenard y la mayoría de sus estudiantes están trabajando sobre fosforescencia y acción fotoeléctrica». De entre las actividades de Gotinga, destacó la investigación sismológica de Wiechert y el laboratorio de Woldemar Voigt, el cual «es justamente celebrado por los numerosos trabajos que están conectados con la física de los cristales y la magneto y electro-óptica. Hay más de 20 estudiantes de investigación». Describió el instituto de Lummer en Breslau, que estaba especializado en óptica, como «espléndido». Pero no todo eran alabanzas: «El instituto físico de Leipzig es quizá el mayor de Alemania; pero veo que lo mayor no es siempre lo mejor. Por muy pobre que sea el laboratorio, florecerá si tiene investigadores serios y un director capaz. El tamaño y el equipamiento del laboratorio en mi opinión tienen un papel secundario en las investigaciones científicas» (Badash 1967, p. 60).

El relato de Nagaoka se limitaba a la física clásica. No mencionaba la teoría cuántica y la teoría de la relatividad sólo de pasada: «En Múnich [...] también existe un instituto de física teórica bajo la dirección de Sommerfeld, quien también trabaja en el principio de la relatividad». Esto no se debía a que Nagaoka fuera un conservador que no había descubierto la revolución que en teoría había acontecido en la física durante la primera década del siglo. La física clásica era completamente dominante por aquel

entonces, y de una manera saludable y progresista; las nuevas teorías de los cuantos y de la relatividad se cultivaban sólo por una muy pequeña minoría de la comunidad física y eran apenas visibles en el paisaje general de la física. Si es que había una revolución en camino, pocos eran conscientes de ello. Esta impresión se confirma en un análisis de la distribución de especialidades físicas tomadas de revistas principales de resúmenes. Así, los 2.984 artículos incluidos en el volumen de 1910 de los *Beiblätter zu den Annalen der Physik* (véase tabla 2.7) muestran que casi la mitad de las publicaciones eran de óptica (16 por 100) y electricidad y magnetismo (31 por 100). La categoría de «física cósmica» podría llevar a pensar en astrofísica o cosmología física en el sentido moderno, pero eso sería un anacronismo. Los temas de astrofísica y cosmología sí que aparecían en la categoría, pero también la espectroscopía astronómica, la geofísica, la meteorología, la electricidad atmosférica y el geomagnetismo. En la revista de resúmenes de la Sociedad Física de Berlín, *Fortschritte der Physik*, la «física cósmica» se introdujo en 1890, a la vez que el término «geofísica». («Astrofísica» es un término más antiguo, que apareció por primera vez en 1873.) La física cósmica era un intento interdisciplinario de llevar éstos y otros fenómenos al dominio de la física. Era una rama popular de la física alrededor del cambio de siglo cuando Svante Arrhenius, el químico físico sueco, escribió su influyente *Lehrbuch der kosmischen Physik* (1903). Diez años después, sin embargo, la física cósmica había sido relegada a la periferia de la física.

La composición general de los temas físicos proporcionada por los *Beiblätter* se confirma con los *Science Abstracts* norteamericanos, que listaban 1.810 publicaciones de física en 1910. Las diferencias son debidas principalmente a las distintas maneras de clasificar los temas. Por ejemplo, mientras la mayoría de los artículos del grupo llamado en los *Beiblätter* «constitución y estructura de la materia», trataban de química fí-

TABLA 2.7
Distribución de especialidades en el volumen de 1910 de *Beiblätter*

Especialidad	*Número*	*Porcentaje*
Electricidad y magnetismo	913	31
Óptica	488	16
Constitución y estructura de la materia	351	12
Física cósmica	321	11
Calor	293	10
Mecánica	264	9
Radiactividad	182	6
Medidas y pesos	60	2
General	59	2
Acústica	27	1
Histórico y bibliográfico	26	1

sica, *Science Abstracts* definía el área más estrechamente y añadía una lista separada de «física química» (lo cual no era lo mismo que la física química moderna, una subdisciplina posterior a 1930). Cada una de las áreas principales se dividía en un número de subentidades. La composición de la categoría «constitución y estructura de la materia» muestra claramente que el contenido no era la física atómica y molecular, sino lo que llamaríamos química teórica. Las subdivisiones se daban como sigue: general; masa, densidad; peso atómico; peso molecular; elementos [químicos]; compuestos; reacciones; afinidad, equilibrios; soluciones; absorción, adsorción; coloides; soluciones sólidas, aleaciones; cristales; y fluidos cristalinos.

En ninguna de las revistas de resúmenes contaban demasiado los artículos sobre física atómica, y se pueden buscar en vano entradas sobre temas como «estructura atómica», «teoría cuántica», «relatividad», o nombres asociados. Por supuesto, aparecían artículos que trataban de estos temas, pero estaban ocultos bajo otras entradas y eran pocos. Por ejemplo, los artículos sobre relatividad se incluían por lo común bajo el título «general» y los relacionados con los cuantos aparecían en las secciones de «calor» y «óptica». Un examen de los títulos en las dos revistas de resúmenes lleva a la estimación de que, en 1910, menos de cuarenta artículos trataban de la teoría de la relatividad y menos de veinte de la teoría cuántica. La «nueva física» era todavía una actividad marginal, pero no lo sería por mucho tiempo. La impresión de la dominación de la física clásica experimental se confirma de manera adicional mediante un recuento de los artículos en el *Nuovo Cimento* italiano. Entre 1900 y 1904 la física clásica (definida como mecánica, óptica, acústica, termodinámica y electromagnetismo) y la física aplicada representaban el 33 por 100 y el 22 por 100 de las publicaciones, respectivamente; diez años después los porcentajes eran de 32 y 17. La mayoría de las publicaciones eran experimentales, en concreto 86 por 100 en 1900-1904 y 77 por 100 en 1910-1914. Los artículos sobre relatividad y teoría cuántica eran muy escasos, menos de 10 en el periodo de cinco años 1910-1914.

CAPÍTULO 3

Descargas en gases y lo que siguió

Uno de los encantos de la física es que trata de la naturaleza y la naturaleza guarda sus secretos. Existen fenómenos naturales, o fenómenos reproducibles en el laboratorio (que son en todo caso naturales) de los cuales los físicos, en cierto momento, no tienen conocimiento. El descubrimiento de nuevos fenómenos tiene a veces importante consecuencias para nuestra imagen del mundo. Los físicos de la década de 1890, que creían que el fundamento de la física estaba fijado de una vez por todas, asumían implícitamente que todos los fenómenos de la naturaleza importantes ya eran conocidos. Les esperaba una sorpresa, como se demostró de manera notoria con la serie de descubrimientos de entre 1895 y 1900.

Leyendo el capítulo 1, uno puede haberse quedado con la impresión de que la mayoría de los físicos de la década de 1890 estaban ocupados con profundas preguntas teóricas acerca de los fundamentos de la física. Sin embargo, esto está lejos de ser el caso. La gran mayoría eran experimentales investigando, por ejemplo, métodos de medidas eléctricas, fenómenos térmicos, espectroscopía y descargas eléctricas en gases. Aunque los primeros experimentos con descargas en tubos de vidrio al vacío se realizaron tan pronto como a finales del siglo XVIII, fue sólo en la década de 1850 que el área atrajo serio interés, sobre todo como resultado del trabajo pionero del suizo Auguste de la Rive y del alemán Julius Plücker. Johann Wilhelm Hittorf, un estudiante de Plücker, investigó de manera sistemática la luz que aparecía en los tubos, y la identificó con rayos que se emitían del cátodo y se movían en línea recta a través de un espacio libre de campos; es decir, con los rayos catódicos, un nombre que introdujo por vez primera el físico berlinés Eugen Goldstein en 1876. El tema se había convertido por aquel entonces en una importante parte de la física; recibió atención adicional de los experimentos realizados por William Crookes en Inglaterra. En 1879, Crookes lanzó la hipótesis de que los rayos catódicos eran corpusculares: una corriente de moléculas electrificadas, o lo que el llamaba un «cuarto estado de la ma-

teria». El joven Heinrich Hertz fue uno de los muchos que sentían el atractivo reto que presentaba el nuevo campo, sobre todo porque parecía ofrecer una vía rápida hacia el reconocimiento, pero también porque los fenómenos de descarga eran enigmáticos y simplemente fascinantes de mirar. «En medio de todo», escribió acerca de sus primeros experimentos en 1882, «se halla la luminosa campana en la cual los gases representan las más enloquecidas travesuras bajo la influencia de las descargas y producen los fenómenos más extraños, variados y coloridos. Realmente, mi habitación se parece mucho en estos momentos a la cocina de una bruja» (Buchwald 1994, p. 132). Los aparatos clave en las cocinas de bruja de Hertz y de otros investigadores de los rayos catódicos eran una serie de tubos de vacío específicamente diseñados, provistos de electrodos, una bobina de inducción de Ruhmkorff para generar la alta tensión necesaria y, por último –pero no por ello menos importante–, las vitales bombas de vacío.

Visto en retrospectiva, la pregunta sobre la naturaleza de los rayos catódicos era la más importante en esta área de investigación. Sin embargo, no se consideraba un asunto de crucial importancia. Muchos físicos se ocupaban de otros aspectos de los fenómenos de descarga, como las zonas o tubos de luz coloreada y su comportamiento bajo la acción de campos magnéticos. Al final de la década de 1890, algunos físicos creían haber hallado un nuevo tipo de rayos catódicos, a veces denominados «rayos magnéticos», pero la proclamación de este descubrimiento no fue generalmente aceptada. El fracaso de Hertz en detectar una deflexión de los rayos catódicos cuando éstos cruzaban el campo eléctrico de un condensador plano le llevó a concluir que los rayos eran eléctricamente neutros y que no eran un efecto primario de la descarga. De acuerdo con este punto de vista, fluía una corriente eléctrica por dentro del tubo, pero los rayos catódicos observados eran distintos de la corriente que generaba los rayos como una especie de flujo u onda en el éter. Las conclusiones de Hertz eran contrarias a la hipótesis corpuscular de Crookes y otros investigadores británicos, pero era apoyada por la mayoría de los físicos alemanes. Recibió un fuerte apoyo experimental por parte de los experimentos realizados en 1894 por el estudiante de Hertz, Philipp Lenard, quien colocó una delgada película de metal como ventana en el tubo y mostró que los rayos catódicos podían atravesarla. Si los rayos fueran haces de partículas atómicas o moleculares está permeabilidad no podía explicarse. Toda el área era confusa, con evidencia experimental en desacuerdo con todos los puntos de vista rivales, y ninguna que pudiera discriminar claramente entre ellas. Por ejemplo, el mismo año en el que Lenard proporcionó apoyo experimental a la hipótesis del pulso del éter, J. J. Thomson en Inglaterra argumentó que la velocidad de los rayos catódicos era tan sólo una milésima de la luz; si los rayos fueran procesos electromagnéticos en el éter, cabía esperar que la velocidad fuera muy cercana a la de la luz. Los experimentos de Lenard, y la situación indecisa en la investigación general de los rayos catódicos, hicieron que muchos físicos alemanes abordaran el problema. Uno de ellos fue Wilhelm Conrad Röntgen, un profesor de física relativamente poco distinguido de la universidad de Würzburg.

Un nuevo tipo de rayos

Inspirado por los hallazgos de Lenard, Röntgen empezó a investigar la penetrabilidad de los rayos catódicos en el otoño de 1895. Como otros físicos que experimentaban con los rayos, utilizaba una pantalla con platino-cianuro bario para detectar la fluorescencia causada por los rayos catódicos. La pantalla, que se suponía no desempeñaba ningún papel en el experimento particular, se colocaba a cierta distancia del tubo, que se cubría con cartón negro y se operaba en una habitación a oscuras. El 8 de noviembre de 1895, Röntgen notó, para su sorpresa, que la pantalla emitía fluorescencia, un fenómeno que no podía ser causado por los rayos catódicos en absoluto. Tras confirmar que el fenómeno era real, emprendió una investigación sistemática de lo que pronto empezó a considerar un nuevo tipo de rayos, distintos tanto de la luz como de los rayos catódicos. En palabras del propio Röntgen, de su comunicación original de enero de 1896, su observación fue ésta: «Si pasamos la descarga de una bobina de Ruhmkorff a través de un [tubo de] Hittorf o un aparato de Lenard, Crookes o similar que esté suficientemente exhausto y cubrimos el tubo con un manto que se ajuste bastante, o con cartón negro delgado, observamos en una habitación totalmente oscura que una pantalla de papel cubierta con cianuro-platino-bario se ilumina brillantemente y emite fluorescencia tanto si se orienta su lado tratado como el otro hacia el tubo de descarga» (Segré 1980, p. 22). El 8 de noviembre es el aniversario oficial de los rayos X, pero por supuesto es demasiado simplista afirmar que Röntgen simplemente descubrió los rayos la tarde de esta fecha. Se percató de un fenómeno sorprendente, y transformar la observación original en un descubrimiento requirió trabajo duro y mucha reflexión. Sólo fue a finales del año que Röntgen estuvo seguro de que realmente había descubierto un nuevo tipo de rayos y entonces anunció su descubrimiento. Llamarlo el descubrimiento de año, incluso de la década, no sería ninguna exageración. Contrariamente a la práctica de una generación de físicos posterior, Röntgen no convocó una conferencia de prensa. De hecho, trabajó solo y mantuvo su descubrimiento en secreto hasta que apareció publicado.

Los nuevos rayos de Röntgen causaron una enorme conmoción, sobre todo entre físicos y doctores de medicina, pero también entre el público en general. La pregunta número uno entre la comunidad de físicos se refería a la naturaleza de los nuevos rayos, cuya categorización y comprensión parecía incluso más difícil que la de los rayos catódicos. Es sus investigaciones preliminares, Röntgen había hallado que los rayos compartían algunas de las propiedades de la luz, en el sentido de que seguían líneas rectas, afectaban a las placas fotográficas y no eran influidos por campos magnéticos; por otro lado, no exhibían ni reflexión ni refracción y por tanto parecían ser distintos tanto a la luz como a las ondas electromagnéticas hertzianas. Sugirió tentativamente que los rayos podrían ser vibraciones longitudinales del éter, una idea que recibió apoyo de varios físicos durante un tiempo. Sin embargo, ni ésta ni otras ideas, incluyendo la sugerencia de que los rayos X eran un tipo extremo de radiación ultravioleta, ganó reconocimiento general. Durante más de una década, los físicos trabajaron felizmente con los rayos X sin saber con qué trabajaban. Esta falta de conocimiento no impidió que se estableciera un creciente cuerpo de conocimiento empírico sobre los nuevos rayos, ni impidió

que los rayos se utilizaran como herramienta en física experimental. Por ejemplo, pronto se advirtió que los tubos de rayos X eran idóneos para ionizar gases y, por esta capacidad, los nuevos tubos se utilizaban ampliamente en experimentos. El debate sobre la naturaleza de los rayos X continuó hasta que se acumularon la suficientes evidencias apuntando a que se trataba de una especie de onda electromagnética (transversal), posiblemente con una longitud de onda extremadamente corta. Esta creencia se hizo más fuerte cuando el físico británico Charles Barkla concluyó, a partir de experimentos de dispersión en 1905, que los rayos X mostraban polarización. Mas el asunto no estaba resuelto en absoluto, y otros experimentos parecieron contradecir la hipótesis ondulatoria y favorecer un tipo de radiación corpuscular, como sostuvo William Bragg en 1907. Con la ventaja de un punto de vista posterior, podemos decir que la confusa situación experimental reflejaba la dualidad onda-corpúsculo sólo aclarada con la llegada de la mecánica cuántica. Los rayos X son tanto partículas como rayos, así que no es extraño que los físicos de principios de siglo obtuvieran resultados ambiguos. Sobre 1910, parecía que los rayos X podrían ser simplemente ondas electromagnéticas de longitud de onda muy corta. Si esto fuera así, la difracción de los rayos requeriría una red con un espaciamiento igualmente corto, y en 1912 Max von Laue se dio cuenta de que estos espaciamientos se encontraban en las distancias interatómicas entre los iones de un cristal. El experimento fue llevado a cabo por el físico de Múnich Walter Friedrich y su estudiante Paul Knipping en la primavera de 1912. La colaboración entre el teórico Laue y los experimentales Friedrich y Knipping resultaron en el primer patrón de difracción de rayos X de la historia. Esto proporcionó, a la vez, una prueba decisiva de que los rayos X eran ondas electromagnéticas, con una longitud de onda con un orden de magnitud de 10^{-13} m. A partir de los experimentos de Múnich surgió una nueva rama enorme de investigación en rayos X, el uso de la difracción de rayos X en cristalografía. Con pioneros como William H. Bragg y su hijo William L. Bragg, entre otros, la rama pronto pasó a ser de gran importancia en química, geología, metalurgia e incluso biología. Por ejemplo, la cristalografía de rayos X fue un elemento clave en la celebrada determinación en 1953 de la estructura de doble hélice de la molécula de ADN.

A finales de la década de 1890, el sensacional descubrimiento de Röntgen causó una revolución menor en la física e inspiró a muchos físicos a empezar a investigar el nuevo fenómeno. Raras veces se ha recibido un descubrimiento de manera tan entusiasta tanto por científicos como por no científicos. De acuerdo a la bibliografía, sólo en 1896 aparecieron 1.044 publicaciones sobre rayos X, incluyendo 49 libros. Entre los muchos físicos que se unieron a la tendencia de los rayos X estaba Henri Becquerel, profesor de física en el Museo de Historia Natural de París.

De los rayos de Becquerel a la radiactividad

En enero de 1896, el descubrimiento de Röntgen se discutió en la Academia Francesa de las Ciencias, donde Poincaré sugirió que la causa de los rayos podría no ser eléctrica, sino relacionada con la parte fluorescente del tubo de vidrio. Si eso era así,

des generalizaciones de la ciencia moderna [...] que todos los fenómenos del universo físico no son sino manifestaciones diferentes de los distintos modos de movimiento de una sustancia que todo lo inunda: el éter».

Maxwell consideró la posibilidad de explicar la gravedad según su teoría electromagnética, pero abandonó tras darse cuenta de que entonces tendría que atribuir una enorme energía intrínseca al éter. Otros físicos victorianos se desanimaron menos fácilmente y, en el último cuarto del siglo, hubo numerosos intentos de explicar o revisar la divina ley de la gravedad de Newton. Algunos de estos intentos se basaban en modelos electrodinámicos y otros en hidrodinámicos. Por ejemplo, en los años 1870 el físico noruego Carl A. Bjerknes estudió el movimiento de cuerpos en un fluido infinito e incompresible, llegando a la conclusión de que dos esferas pulsantes darían lugar a fuerzas entre ellas que cambiarían con el inverso de la separación entre sus centros. Consideró esto como una posible explicación hidrodinámica de la gravedad, o al menos una analogía interesante. El trabajo de Bjerknes fue retomado por algunos teóricos británicos y en 1898 fue revivido por el alemán Arthur Korn de la Universidad de Múnich, quien desarrolló una teoría hidrodinámica de la gravitación. En ese momento, sin embargo, el enfoque estaba puesto en la electrodinámica y los complejos modelos hidrodinámicos del estilo de Bjerknes y Korn no despertaron mucho interés.

Relacionados con el pensamiento de la hidrodinámica, pero de mayor importancia y grandiosidad (si bien no con mayor éxito), fueron los intentos de construir el mundo únicamente a partir de estructuras en el éter. La teoría más importante de las no electromagnéticas fue la teoría atómica de vórtices, originalmente sugerida en 1867 por William Thomson (más tarde, Lord Kelvin) y desarrollada ulteriormente por toda una escuela británica de físicos matemáticos. De acuerdo con esta teoría, los átomos eran modos de movimiento de los vórtices en un fluido primitivo, perfecto, normalmente identificado con el éter. En su ensayo de 1882, premio Adams, el joven J. J. Thomson relató de manera elaborada la teoría de vórtices y la extendió a problemas químicos, incluyendo la afinidad y la disociación. La teoría también se aplicaba al electromagnetismo, la gravitación y la óptica y era un intento ambicioso de establecer una «teoría del todo» unitaria y continua basada únicamente en la dinámica del éter. Tan tarde como en 1895, William Hicks presentó un informe optimista sobre lo más novedoso del átomo de vórtices en el encuentro anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia (BAAS en sus siglas en inglés, British Association for the Advancement of Science). Vale la pena dedicarle algo de espacio a una cita de Hicks que expone su punto de vista sobre la meta de la física teórica:

> Mientras, por un lado, la finalidad de la investigación científica es el descubrimiento de leyes, por el otro, la ciencia habrá alcanzado su máximo objetivo cuando haya reducido las leyes a una o dos, cuya necesidad está fuera de la esfera de nuestro entendimiento. Estas leyes últimas –en el dominio de la ciencia física al menos– serán las leyes de la dinámica de la relación de materia a número, espacio y tiempo. Los últimos datos serán los mismos número, materia, espacio y tiempo. Cuando estas relaciones se conoz-

tensivamente la geometría no euclídea para su trabajo en astronomía. A pesar de que estos y otros trabajos eran, por lo general, especulativos y siempre hipotéticos, a finales de siglo existió un grupo pequeño de investigadores que consideraron los modelos de éter hiperespaciales o que si no intentaron relacionar el espacio tetradimensional con problemas de interés físico. Especulativos o no, estos intentos se consideraban legítimos en el marco del espíritu de la física característico de los años 1890.

Los modelos hidrodinámicos del éter diferían del programa laplaciano de la física, pero en todo caso se apoyaban en una base mecánica y no eran intentos de derrocar la imagen del mundo newtoniana. Después de todo, la hidrodinámica es la ciencia mecánica de los fluidos. La termodinámica, la ciencia del calor y de otras manifestaciones de energía, constituía un problema mucho más difícil para la cosmovisión clásica. A veces se argumentaba que esta rama de la física no sólo era diferente de la mecánica en principio, sino que además tenía prioridad sobre ésta como una base más sólida sobre la que sería posible construir toda la física. En los años 1890, junto con la electrodinámica, la termodinámica empezó a competir con la mecánica en lo relativo a problemas de base. En esta década se daba un debate continuo sobre la *unidad* de la física, y no estaba en absoluto claro qué disciplina podría servir mejor como base de la unidad que casi todos los físicos creían que su ciencia debía tener.

Mientras que la ley de conservación de la energía se explicaba con éxito en términos mecánicos, la segunda ley de la termodinámica no sucumbió tan fácilmente a éstos. Para empezar, las leyes de la mecánica son reversibles, o simétricas en el tiempo, mientras que la segunda ley de la termodinámica establece un cambio irreversible en la entropía. En su famosa teoría mecánico-estadística de la entropía, desarrollada primero en 1872 y más completamente en 1877, Ludwig Boltzmann creía que había reducido la segunda ley a principios mecánico-moleculares, pero su interpretación fue puesta en duda y se convirtió en objeto de gran controversia. Uno de sus críticos, el físico alemán Ernst Zermelo, basándose en el así llamado teorema de recurrencia de Poincaré, argumentó en 1896 que la segunda ley no podría derivarse de la mecánica y, por lo tanto, que era incompatible con una imagen mecanicista unificada del mundo. Boltzmann negó la validez del argumento de Zermelo y siguió convencido de que no había un desacuerdo profundo entre la mecánica y la termodinámica.

De acuerdo con el físico Georg Helm y con el químico Ludwig Ostwald, ambos alemanes, la energía era el más importante de los conceptos unificadores de la ciencia física. Por tanto, se mantenía que una termodinámica generalizada tendría que reemplazar a la mecánica como base de la física. Helm y Ostwald llegaron a esta conclusión alrededor de 1890 y llamaron a su nuevo programa la *energética*. En muchos sentidos la nueva ciencia de la energética era contraria a la cosmovisión mecanicista y se veía como una revuelta contra lo que se llamaba «materialismo científico». Esta revuelta incluía la postura de que la mecánica tenía que ser sometida a las leyes más generales de la energética; en el sentido de que se mantenía que las leyes mecánicas debían ser reducibles a principios energéticos. Otro aspecto de la energética era su negación del atomismo, excepto como útil representación mental. Ostwald y algunos otros químicos fí-

vel local en física teórica. Como escribió en el ensayo popular *El viaje de un profesor alemán a El Dorado*» por primera vez publicado en 1905: «En efecto, Estados Unidos conseguirá grandes cosas. Creo en esta gente, incluso después de haberles visto trabajando en un entorno que no es el más favorable para ellos: integrando y derivando en un seminario de física teórica [...]» (Boltzmann 1992, p. 51).

La física siempre ha sido internacional y los contactos entre físicos de distintas nacionalidades, incluyendo encuentros y colaboraciones, eran frecuentes en el siglo XIX. Sin embargo, las conferencias organizadas de ámbito más amplio eran escasas, y hasta el verano de 1900 no se convocó el Primer Congreso Internacional de Física, en París. Al mismo tiempo, y en la misma ciudad, 200 matemáticos participaban en el Congreso Internacional de Matemáticas, el segundo de su tipo. La conferencia de física estuvo organizada por la Sociedad Francesa de Física, en conexión con la Exposición Universal de París ese año. Las actas del congreso en tres volúmenes incluían 70 reseñas científicas escritas por físicos de quince países. No es sorprendente que la mayoría de los artículos (36) fueran franceses. A éstos les seguían 10 contribuciones alemanas y 6 británicas, mientras que la cuarta de las principales naciones científicas, los Estados Unidos, contribuía sólo con dos artículos. También estaban representados físicos de Holanda (4 artículos), Rusia (4), Italia (3), Austria-Hungría (3), Dinamarca (2), Noruega (2), Suecia (2), Bélgica (2) y Suiza (2); los no blancos estaban representadas por artículos proporcionados por un japonés y un indio. Por supuesto la fuerte representación francesa en el congreso de París no debería tomarse como una posición equivalentemente fuerte en la física mundial; de hecho, la física francesa, y especialmente la física teórica, estaba en declive por aquel entonces y ya no era competitiva de la física en Alemania y Gran Bretaña. Los temas tratados en el congreso de París cubrían un amplio espectro, aunque no fuera toda la gama de la física contemporánea. La tabla 2.3 muestra los temas de los artículos invitados. Hubo seminarios sobre metrología, elasticidad, fenómenos críticos, propiedades mecánicas y térmicas de sólidos y líquidos, espectroscopía, presión lumínica, ondas hertzianas, magneto-óptica, electricidad atmosférica, física solar, biofísica y gravitación.

Tampoco se olvidaron los más recientes descubrimientos: Henri Becquerel y los Curie hablaron de radiactividad, Wilhelm Wien y Otto Lummer sobre la radiación del cuerpo negro (desde el punto de vista teórico y experimental respectivamente), Paul Villard sobre rayos catódicos y J. J. Thomson sobre la teoría de los electrones y la constitución atómica. La discusión de los rayos catódicos de Villard es difícil que satisficiera a Thomson, o a la mayoría de los otros físicos que asistían. Tres años después de la celebrada identificación por parte de Thomson de los rayos catódicos con los electrones libres, el físico francés argumentaba que los rayos catódicos no consistían en electrones sino en iones de hidrógeno.

Comparada con los niveles que alcanzaría, la física era una actividad ridículamente barata, pero desde la perspectiva de la financiación contemporánea habitual de la ciencia, las cosas parecían diferentes. A los gastos de salarios y equipo se añadían los muchos nuevos laboratorios que se crearon en la década de 1890 y los primeros años

había razones para suponer que todos los cuerpos fuertemente fluorescentes emitían rayos X además de sus rayos lumínicos. Los comentarios de Poincaré fueron asumidos por Becquerel, un experto en fluorescencia, y el 24 de febrero comunicó a la academia que una sal doble de uranio, sulfato potásico de uranio, fluorescente, emitía lo que él creía que eran rayos X. Había colocado la sal sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro, la había expuesto a la luz solar durante varias horas, y había observado entonces un bien definido oscurecimiento de la placa cuando fue revelada. ¿Se había descubierto la radiactividad en este momento? No del todo, ya que Becquerel creía que los penetrantes rayos eran un resultado de la fluorescencia y que la exposición al sol era por tanto crucial. Una semana más tarde, cuando repitió el experimento, pero el sol no brillaba, se dio cuenta de que la sal de uranio emitía los rayos hasta en ausencia de luz solar. Entendió por fin que había hecho un descubrimiento, en concreto que la sal de uranio emitía penetrantes rayos sin acción eléctrica y sin la acción de la luz solar. El nuevo fenómeno era al parecer distinto tanto de los rayos X como de la fluorescencia. Además, rápidamente descubrió que los rayos también eran emitidos por otras sales de uranio e incluso más fuertemente por el uranio metálico, no fluorescente. De ahí que los rayos se llamaran originalmente a menudo «rayos de uranio».

El descubrimiento de la radiactividad por parte de Becquerel fue afortunado, pero no accidental. Al contrario que Röntgen, el físico francés se guió por una hipótesis que quería comprobar, en particular, que los cuerpos intensamente fluorescentes emiten rayos X. Pero la mayoría de los materiales fluorescentes no son radiactivos, así que ¿por qué se concentró en las sales de uranio? Su elección ha sido tradicionalmente atribuida a la suerte, pero no se debía a la suerte en absoluto. Anteriormente, junto con su padre Edmond Becquerel (quien también era profesor en el Museo de Historia Natural de París), había estudiado los espectros de fluorescencia de compuestos de uranio y observado que las bandas espectrales obedecían a una notable regularidad. Es probable que esta regularidad, peculiar de las sales de uranio fluorescentes, inspirara a Becquerel la idea de que la imagen visible del sol era trasformada en las mucho menores longitudes de onda características de los rayos X. Esta transformación está prohibida de acuerdo a la ley de Stokes, descubierta por Gabriel Stokes en 1852. De acuerdo a esta ley, los cuerpos fluorescentes tan sólo pueden emitir radiación de una longitud de onda mayor que la de la radiación que los excita. La ley de Stokes es correcta –se sigue de la teoría cuántica de la radiación– pero en la última parte del siglo XIX se dieron muchas comunicaciones de «fluorescencia anómala», es decir, excepciones a la ley de Stokes. La ley no se consideraba absoluta y, de acuerdo a una teoría sugerida por el físico alemán Eugen Lommel, la fluorescencia anómala debería tener lugar en sustancias que exhibían el tipo de espectros regular que Becquerel había observado en las sales de uranio. Si ésta era de hecho la manera de razonar de Becquerel, no es entonces tan extraño que escogieran compuestos de uranio para su investigación. Su observación original de los rayos penetrantes emanando de sales de uranio expuestas a la luz solar podría tan sólo haber confirmado lo que él más o menos anticipaba. Los sucesos posteriores no lo hicieron.

Los rayos de uranio no causaron tanta sensación como los rayos X y durante un año o dos, Becquerel fue uno de un puñado de físicos que estudiaba activamente el nuevo fenómeno. Después de todo, los efectos de los rayos de uranio eran débiles y muchos físicos los consideraban tan sólo un tipo especial de rayos X, aunque con un origen cuya explicación se resistía. Desde la perspectiva de Becquerel, que creía que los rayos de uranio estaban relacionados con los peculiares espectros de los compuestos de uranio, no había razón para suponer que los rayos también fueran emitidos por otros compuestos. Sólo cuando Marie y Pierre Curie descubrieron sustancias mucho más activas que el uranio la radiactividad llegó a los titulares y se convirtió en un fenómeno de gran importancia para los físicos.

La radiactividad del torio se anunció en la primavera de 1898, de manera independiente por parte de Marie Curie y del alemán Gerhard Schmidt. Más tarde en el mismo año, Marie y Pierre Curie descubrieron en minerales de uranio dos elementos desconocidos hasta entonces, a los que propusieron llamar polonio y radio. El radio, extraordinariamente activo, descubrió la radiactividad para el gran público e inició una nueva y excitante fase en el estudio de los rayos de Becquerel. Por cierto, los términos «radiactividad» y «sustancias radiactivas» fueron introducidos por Marie Curie el mismo año, 1898. Durante los siguientes años, un número creciente de físicos en Europa y Norteamérica asumieron el estudio de la radiactividad, que pronto pasó a ser una de las áreas de la física de más rápido crecimiento. «Debo seguir adelante, dado que siempre hay gente siguiéndome», escribió Rutherford a su madre en 1902. «Debo publicar mi trabajo actual lo antes posible para mantenerme en la carrera. Los mejores velocistas en esta carretera de la investigación son Becquerel y los Curie en París, quienes han llevado a cabo gran cantidad de trabajos importantes sobre el tema de los cuerpos radiactivos durante estos últimos años» (Pais 1986, p. 62).

Los primeros trabajos sobre radiactividad eran principalmente experimentales y de exploración. ¿Qué sustancias eran radiactivas? ¿Cómo encajaban en el sistema periódico de los elementos? ¿Cuáles eran los rayos emitidos por los cuerpos radiactivos? ¿Se veía afectada la actividad por cambios físicos o químicos? Éstas eran algunas de las preguntas que los físicos proponían a finales del siglo –y no sólo físicos, ya que la radiactividad les preocupaba a los químicos por igual–. Ya fueran físicos o químicos, su enfoque era fenomenológico y de exploración; es decir, centrado en la recolección y clasificación de datos. Fue un periodo de gran confusión y de callejones sin salida. Por ejemplo, durante los primeros ocho años del siglo, aproximadamente, se creía por lo general que todos los elementos eran radiactivos. Después de todo, era difícil creer que la propiedad estaba confinada a unos pocos elementos pesados, y los crudos métodos de detección parecían indicar que, en efecto, se podía encontrar radiación débil en todas partes.

De los muchos temas dentro del estudio de la radiactividad, la naturaleza de los rayos era uno de los más importantes. Ya en 1901 se había establecido que los rayos eran complejos, ya que consistían en tres especies de diferente penetrabilidad. Los rayos beta, fáciles de deflectar en un campo magnético, se identificaron rápidamente como electrones veloces, mientras se acabó descubriendo (sobre 1912) que los rayos gamma,

neutros, eran ondas electromagnéticas similares a los rayos X. La naturaleza de los rayos alfa era bastante misteriosa. Los primeros experimentos indicaban que no se deflectaban a través de campos eléctricos y magnéticos y eran por lo tanto neutros, un punto de vista que Rutherford, entre otros, mantuvo durante un breve periodo. Sin embargo, experimentos adicionales, llevados a cabo sobre todo por Rutherford en la Universidad McGill en Montreal, mostraron que las partículas tenían carga positiva y de una masa comparable a la del átomo de hidrógeno. Sobre 1905, se había acumulado evidencia de que las partículas alfa eran átomos de helio doblemente cargados, He^{2+}. La hipótesis se confirmó brillantemente en 1908, mediante un experimento que Rutherford, ahora en Manchester, realizó junto con su asistente Thomas Royds. Rutherford y Royds probaron mediante espectroscopía que se producía helio a partir de las partículas alfa emitidas por el radón. Junto con los datos de la deflexión magnética de los rayos alfa, esta identificación resolvió el asunto.

Incluso más importante que la naturaleza de los rayos fue la evidencia de que la radiactividad no es un fenómeno permanente, sino que decae con el tiempo. Una sustancia radiactiva se convierte en otra sustancia en el sentido de que los átomos cambian –se transmutan– de un elemento a otro. Éste era el contenido básico de la ley de transformación sugerida por Rutherford y por el químico Frederic Soddy en 1902. De acuerdo con esta ley, no sólo los átomos se transmutan, sino que también lo hacen aleatoriamente, lo cual se expresa por el hecho de que la transformación posea una constante de desintegración (λ) que depende sólo de la naturaleza del elemento radiactivo. Si el número de átomos era originalmente N_0, tras un tiempo t el número se vería reducido a $N(t) = N_0\exp(-\lambda t)$. Como Rutherford dejó claro, esto significa que la probabilidad de desintegración de un átomo es independiente de la edad de éste. Éste era un fenómeno muy peculiar, y se hizo más peculiar aún cuando se descubrió en 1903 que la energía liberada continuamente por el radio era enorme: unas 1.000 calorías por gramo por hora. ¿De dónde provenía la energía? Si la radiactividad procedía en efecto de cambios subatómicos, ¿cuál era la causa de los cambios? La mayoría de los científicos evitaban cuestiones teóricas de este tipo, pero se consideraban legítimas en todo caso, y varios físicos y químicos estaban dispuestos a especular sobre el origen de la radiactividad. De acuerdo con una hipótesis ampliamente aceptada, basada en el modelo atómico de J. J. Thomson, la radiactividad estaba causada por cambios en la configuración interna del átomo. Desde 1903, este tipo de modelo dinámico cualitativo lo propusieron, en diferentes versiones, Thomson, Oliver Lodge, Lord Kelvin, James Jeans y otros. Rutherford había abogado por un mecanismo similar desde tan pronto como 1900, y en 1904, en su clase bakeriana, arguyó que «los átomos de los radio-elementos se pueden suponer compuestos de electrones (partículas β) y grupos de electrones (partículas α) en rápido movimiento, y mantenidos en equilibrio por sus fuerzas mutuas.» Los electrones acelerados radiarían energía y esto «debe perturbar el equilibrio del átomo y resultar o bien en una nueva disposición de sus partes constitutivas o en su desintegración final» (Kragh 1997a, p. 18). Aunque Rutherford pronto decidió que el estado de la teoría atómica no permitía una explicación bien definida de

la radiactividad, ni él ni otros investigadores dudaban que la radiactividad pudiera ser explicada causalmente en términos de la dinámica subatómica. De hecho, estos fútiles intentos prosiguieron hasta mediados de la década de 1920.

Sabemos que la radiactividad es un fenómeno probabilístico que desafía una explicación causal y que su naturaleza probabilística se expresa mediante la ley de desintegración. Esto fue vagamente sugerido por Rutherford y Soddy en 1902 y aducido más completamente por Egon von Schweidler en 1905. Desde este punto de vista, parece extraño que los físicos, Rutherford y Thomson incluidos, buscaran a pesar de todo explicaciones causales en términos de cambios subatómicos. Por aquel entonces, sin embargo, no había motivo para sospechar que la radiactividad era causalmente inexplicable por principio. La teoría estadística no se asociaba con la acausalidad, sino con otros fenómenos estadísticos como el movimiento browniano, donde la naturaleza estadística puede ser resuelta, en principio, en microprocesos deterministas.

Los intentos de diseñar modelos atómicos que explicaran la radiactividad sobre una base mecanicista no tuvieron éxito. En 1910, la mayoría de los físicos o bien ignoraban el problema o adoptaban una actitud pragmática de acuerdo con la cual las leyes fenomenológicas cobraban prioridad sobre las explicaciones mecanicistas. Pero la naturaleza estadística de la radiactividad no se interpretaba como una característica irreducible que hacía necesario un rechazo de los modelos causales por principio. Tal interpretación vino sólo con la mecánica cuántica y, por esta razón, sería un error ver la radiactividad como el primer ejemplo conocido de un fenómeno acausal.

Rayos espurios, más o menos

La radiactividad, los rayos X y los rayos catódicos no eran la única clase de rayos que atraían atención en los años alrededor de 1900. A raíz de estos famosos descubrimientos aparecieron diversas afirmaciones sobre el descubrimiento de rayos que no se confirmaron de manera satisfactoria y que, de hecho, no existen. Si bien estas afirmaciones, algunas de las cuales fueron recibidas con gran interés y aceptadas por muchos físicos durante un periodo de tiempo, no son menos parte de la física que esos otros descubrimientos que clasificamos como «reales» hoy en día. Consideremos, por ejemplo, la «luz negra» que fue anunciada a principios de 1896 por el físico aficionado francés Gustave LeBon, un psicólogo y sociólogo que era un importante miembro de uno de los círculos intelectuales de París, y que también incluía a varios científicos prominentes. LeBon afirmaba haber detectado un nueva e invisible radiación que emanaba de una caja de metal cerrada irradiada por una lámpara de aceite; la radiación podía producir una imagen en una placa fotográfica dentro de la caja. LeBon halló, además, que la luz negra –como él la denominaba– no podía desviarse en un campo magnético y concluyó que no podía tratarse de rayos X o catódicos. En artículos y libros publicados durante la siguiente década, LeBon defendió su descubrimiento, realizó nuevos experimentos con la luz negra y la interpretó como una manifestación de la desmaterialización gradual de la materia en la que él y muchos otros creían (véase tam-

bién el capítulo 1). Aunque las afirmaciones de LeBon se recibieron fríamente entre la mayoría de los físicos y químicos, no fueron ignoradas en la literatura científica. En 1896 la Academia de las Ciencias de París escuchó la lectura de catorce artículos sobre luz negra, a comparar con los tres sobre los rayos de uranio de Becquerel. Entre los simpatizantes con las afirmaciones de LeBon estaba Henri Poincaré, el biofísico Arsène d'Arsonvalle y el físico y posteriormente premio Nobel Gabriel Lippmann. Sin embargo, aunque estos y otros científicos encontraban interesantes las especulaciones de LeBon sobre la materia, la electricidad y la energía, consideraban que la evidencia experimental a favor de la luz negra era poco convincente. Alrededor de 1902, el tema desapareció de las revistas científicas.

El falso descubrimiento de los rayos N en 1903 tiene varias características en común con el caso de la luz negra, pero es incluso más notable por la significante cantidad de afirmaciones de que estos inexistentes rayos se habían confirmado. Al contrario que LeBon, René Blondlot de la Universidad de Nancy era un físico experimental de gran reputación cuando llegó a la conclusión, en la primavera de 1903, de que se emitía una nueva radiación de los tubos de descarga. Los rayos N (la «N» viene de Nancy) podían atravesar metales y madera y podían ser enfocados, reflejados, refractados y difractados. Blondlot y otros investigadores de los rayos N, muchos de ellos en Nancy, pronto encontraron que los rayos se emitían también por quemadores de gas, el sol, lámparas eléctricas incandescentes, metales bajo deformaciones y –lo más sensacional– por el sistema nervioso humano. Como el detector Blondlot empleaba las variaciones en el brillo de un entrehierro y, más adelante, también pantallas con sulfuro de calcio luminoso. Con éstos examinó el espectro de los rayos N, concluyendo que el fenómeno era complejo y que existían distintos tipos de rayos N con distintos índices de refracción. Los rayos N no existen, pero durante algunos años esto no fue en absoluto evidente. De hecho, al menos cuarenta personas «vieron» los rayos y por tanto confirmaron la afirmación de Blondlot y una parte sustancial de los cerca de 300 artículos que se publicaron sobre el tema entre 1903 y 1906 aceptaban que los rayos existían.

¿Cómo podía ser esto posible? No cabe duda de que parte de la respuesta debe encontrarse en factores psicológicos y en la estructura social característica de la comunidad científica francesa. Uno de los investigadores de los rayos N era el joven Jean Becquerel (hijo de Henri Becquerel), quien muchos años más tarde explicaría sus errores iniciales de esta manera: «El método puramente subjetivo utilizado para comprobar los efectos [de los rayos N] es anticientífico. Es fácil entender la ilusión que engañaba a los observadores: con un método tal siempre ves el efecto esperado cuando estás persuadido de que los rayos existen, y tienes, *a priori*, la idea de que tal o cual efecto puede producirse. Si pides a otro observador que controle la observación, él también la ve (siempre que él esté convencido); y si un observador (que no está convencido) no ve nada, concluyes que no tiene un ojo sensible» (Nye 1980, p. 153). El hecho de que los rayos N eran en realidad efectos psico-fisiológicos (y psico-sociológicos) fue también la conclusión de críticos como Heinrich Rubens y Otto Lummer en Alemania, Jean Perrin en Francia y Robert Wood en los Estados Unidos. Los experimentos de Blondlot

se hicieron «con radiación tan débil que ningún observador fuera de Francia ha sido capaz de detectarla en absoluto», como objetó un escéptico. La combinación de las críticas y de los fallos en producir nuevos resultados consistentes con los rayos N tuvo el efecto de que para 1905 se alcanzara el consenso de que los rayos no existían. En Nancy, los rayos sobrevivieron unos pocos años más. Todo este episodio sería visto más adelante como un caso de «ciencia patológica», pero ésta no es una característica razonable. La manera en la que la investigación de los rayos N se desarrolló, no difería fundamentalmente de los primeros desarrollos de la física de la radiactividad o de los rayos cósmicos. Un número relativamente grande de físicos creía que los rayos N existían y que había motivos para tal creencia, pero al final las razones no fueron lo bastante fuertes y fueron contradichas por otros experimentos. El episodio ilustra la potencia de la subjetividad y la ilusión en la ciencia, pero también ilustra la fuerza de la objetividad obtenida mediante la repetición crítica de experimentos.

La luz negra y los rayos N eran tan sólo dos de los varios rayos espurios anunciados en el periodo 1896-1910. *La radiación producida en los tubos de rayos catódicos* colocados en un campo magnético fuerte se había estudiado desde la década de 1850 y, al final del siglo, algunos físicos aportaron pruebas de una nueva clase de rayos catódicos que se comportaban como pulsos de emanación magnética. Estos «rayos magneto-catódicos» atrajeron un considerable interés; los físicos discutían sobre si eran realmente un nuevo tipo de radiación eléctricamente neutra o si se podían explicar mediante la noción de electrones de los rayos catódicos ordinarios. El distinguido físico italiano Augusto Righi creía en 1908 que había encontrado evidencia innegable de lo que él llamaba «rayos magnéticos» y los explicaba como corrientes de dobletes neutrales compuestos de electrones unidos débilmente a iones positivos. De 1904 a 1918, se publicaron 65 artículos sobre los rayos magnéticos, dos tercios debidos a Righi y otros físicos italianos. Si los rayos N eran franceses, los rayos magnéticos eran rayos italianos. Mientras que casi todos los artículos italianos apoyaban el punto de vista de Righi sobre los rayos magnéticos, ninguno de los de fuera de Italia aceptaba su afirmación. La controversia terminó en 1918, cuando nuevos experimentos mostraron que la afirmación de Righi no podía ser correcta. Mientras que los fenómenos en los cuales se basaba la afirmación de los rayos N eran espurios, los experimentos de Righi con rayos magnéticos no se discutían. Su interpretación fue lo único que se probó como falso.

Los informes sobre rayos cósmicos no estaban inicialmente mejor fundados que los de los rayos N. Las medidas de iones libres en la atmósfera empezaron sobre 1900, cuando se creía generalmente que los iones tenían su origen en la radiactividad, ya fuera de la tierra o de sustancias gaseosas en el aire. Existían especulaciones ocasionales sobre un posible origen extraterrestre, pero durante un tiempo las medidas eran todas demasiado imprecisas para sostener esta conclusión. Si la fuerza de la radiación atmosférica fuera la tierra, la intensidad debería decrecer con la altitud; si el origen fuera cósmico, debería incrementarse. Los experimentos que se realizaron alrededor de 1910 –algunos desde globos aerostáticos, algunos desde lo alto de la Torre Eiffel– sólo

produjeron confusión: algunas medidas no mostraban ninguna variación apreciable con la altitud, algunas mostraban un decrecimiento, y algunas un incremento. No fue sino hasta 1912 cuando el físico austriaco Victor Hess obtuvo resultados más fiables durante un vuelo en globo que lo llevó a una altitud de 5.350 m. Hess halló que la intensidad de la reacción primero decrecía pero luego, a altitudes mayores de 1.500 m, empezaba a ascender marcadamente según la altitud se incrementaba. Hess concluyó «que una radiación de muy alto poder penetrante entra en nuestra atmósfera desde arriba» (Xu y Brown 1987, p. 29). La conclusión fue confirmada por el alemán Werner Kohlhörster quien llevó su globo a una altitud máxima de 9.300 metros en 1913-1914. Con estas medidas, la existencia de una radiación cósmica penetrante de naturaleza desconocida quedó establecida, pero hizo falta una década para que la mayoría de los físicos se convencieran de que la radiación era real. Cuando Millikan llevó a cabo medidas desde vuelos en globo sin tripulación en 1922-1923, no consiguió confirmar los resultados de Hess y Kohlhöster y concluyó que la radiación penetrante no existía. Dos años después, sin embargo, encontró la radiación altamente penetrante, acuñó el término «rayos cósmicos», y dejó de dar crédito en sus informes a los resultados que se habían obtenido en Europa mucho antes. En los Estados Unidos, se referían a los rayos con frecuencia como «rayos de Millikan» y Millikan no protestaba. Pero Hess fue al final reconocido como el verdadero descubridor de la radiación y en 1936 recibió el pre-

TABLA 3.1
Reivindicaciones de descubrimientos, 1895-1912 y su estado en 1915

Entidad	*Año*	*Científicos*	*Estado en 1915*
Argón	1895	Rayleigh y W. Ramsay	aceptado
Rayos X	1896	W. Röntgen	aceptado
Radiactividad	1896	H. Becquerel	aceptado
Electrón	1897	J. J. Thomson	aceptado
Luz negra	1896	G. LeBon	rechazado
Rayos de canal	1898	W. Wien	aceptado
Eterio	1898	C. Brush	rechazado
Rayos N	1903	R. Blondlot	rechazado
Rayos magnéticos	1908	A. Righi	en duda
Rayos Moser	1904	J. Blaas y P. Czermak	reinterpretado
Electrones positivos	1908	J. Becquerel	reinterpretado
Rayos cósmicos	1912	V. Hess	incierto

Nota: Los rayos de canal, o rayos positivos, fueron identificados en tubos de rayos catódicos por Eugen Goldstein en 1886; se encontró que consistían de iones de gas positivos. Eterion fue el nombre de un elemento químico consistente puramente de éter que Charles Brush reivindicaba haber descubierto. Los rayos de Moser o metálicos, propuestos por primera vez por el físico L. F. Moser en 1847, a veces se pensaba que eran rayos emanantes de los metales iluminados y de otras sustancias. El fenómeno fue explicado como foto y electroquímico en la naturaleza.

mio Nobel por su descubrimiento. Véase tabla 3.1 para un resumen de las afirmaciones de descubrimientos principales en el periodo de 1895-1912.

El electrón antes de Thomson

A pesar de que se reconoce 1897 como el año del nacimiento oficial del electrón, sería demasiado simplista afirmar que J. J. Thomson simplemente descubrió la partícula en ese año. El electrón tiene una interesante y compleja prehistoria cuya pista puede remontarse razonablemente hasta la primera parte del siglo XIX. De acuerdo con el punto de vista de la teoría eléctrica favorecida en el continente, la materia consistía en, o incluía, corpúsculos eléctricos que interactuaban instantáneamente. Esta versión de la electricidad y el magnetismo se remonta a André-Marie Ampère y Ottaviano Mossotti en la década de 1830, y se puede encontrar en una forma rudimentaria tan pronto como 1759, en un trabajo del científico ruso Franz Æpinus. Más adelante en el siglo XIX fue desarrollada mucho más por varios físicos alemanes, incluyendo a Rudolf Clausius, Wilhelm Weber y Karl-Friedrich Zöllner. En estas teorías, se consideraba que los constituyentes fundamentales tanto de la materia como del éter eran hipotéticas partículas eléctricas. En este sentido, las partículas se correspondían con los electrones posteriores. Durante la década de 1850 y más adelante, Weber y otros intentaron construir modelos de la materia y del éter a partir de partículas de carga positiva y negativa $+e$ y $-e$, siendo e una unidad de carga desconocida. Sin embargo, con la creciente popularidad de la teoría de campos maxwelliana (donde no hay sitio para las partículas eléctricas) las teorías fueron abandonadas por la mayoría de los físicos.

Una fuente bastante distinta del concepto moderno de electrón se puede encontrar en la interpretación corpuscular de las leyes electrolíticas de Michael Faraday, especialmente como las enunciaron George Johnstone Stoney en Irlanda y Hermann von Helmholtz en Alemania. En 1874, Stoney propuso el «electrino» como unidad de carga eléctrica, y en 1891 introdujo el «electrón» como una medida de la unidad de carga atómica. Independientemente de Stoney, Helmholtz discutió la causa de los «átomos de electricidad» en su seminario Faraday de 1881. El electrón de Stoney-Helmholtz podía ser tanto una carga positiva como negativa y, al contrario del concepto de electrón posterior, se concebía como una unidad de cantidad de electricidad más que como una partícula que residiera en todas las formas de la materia. En algunos de sus escritos, sin embargo, Stoney asoció su electrón no sólo con la electrolisis sino también con la emisión de luz. En 1891 sugirió que los electrones rotando en moléculas o átomos podrían ser responsables de las líneas espectrales, una idea que estaba cercana a la que se aceptaría por teóricos del electrón posteriores.

Una tercera versión emergió a principios de la década de 1890 en conexión con las «teorías del electrón», introducidas principalmente por Hendrik A. Lorentz en los Países Bajos y Joseph Larmor en Inglaterra. (Las teorías de Lorentz y Larmor diferían en muchos aspectos, pero para nuestros propósitos ignoraremos las diferencias.) Al con-

trario que las otras versiones, el electrón de Lorentz-Larmor era parte de la teoría del campo electromagnético y se concebía como una estructura en el éter continuo. Estas estructuras con características de partícula se denominaban habitualmente «partículas cargadas» o «iones», pero en su teoría de 1894, Larmor introdujo el término de Stoney «electrón» para referirse a una singularidad en el éter electromagnético. Cualquiera que fuese el nombre, el concepto introducido por Lorentz y Larmor era al principio una entidad altamente abstracta que no se manifestaba necesariamente como una partícula real y observable. Sus partículas cargadas eran de carga y masa no especificadas y generalmente no se pensaba que fueran subatómicas. El electrón electromagnético de Larmor era principalmente una estructura libre en el éter, pero desde aproximadamente 1894, empezó a considerar a los electrones también como unidades primordiales de materia, con carga o bien positiva o bien negativa. Por ejemplo, en 1895 sugirió que «una molécula [átomo] podía estar formada de, o involucrar, una configuración estacionaria de electrones girando» (Larmor 1927, p. 741). Los electrones electromagnéticos habían hecho su entrada en la teoría atómica, aunque hasta entonces de una manera laxa. Hasta 1896, ninguna de las tres rutas hacia el electrón que se han mencionado operaban con partículas que tuvieran una razón carga/masa (e/m) mucho mayor que las razones de los iones determinadas mediante electrolisis.

En 1896 tuvo lugar un cambio crucial en la conceptualización del electrón, con el descubrimiento de Pieter Zeeman de la influencia magnética sobre la frecuencia y polarización de la luz. Zeeman observó un ensanchamiento de las líneas espectrales amarillas del sodio, un resultado que era no sólo imprevisto para la teoría sino también aparentemente contradictorio con las teorías de la emisión de luz asociadas con las teorías del electrón de Lorentz y Larmor. Cuando Zeeman comunicó su resultado a Lorentz, su antiguo profesor y en ese momento colega en la universidad de Leiden, éste respondió que «eso tiene muy mala pinta; no está de acuerdo en absoluto con lo que cabe esperar» (Arabartzis 1992, p. 378). Sin embargo, lo que al principio aparentaba ser una seria anomalía, rápidamente se convirtió en una brillante confirmación de la teoría del electrón. Según Lorentz, la emisión de luz era consecuencia de «iones» vibrando. Cuando se encontró con el descubrimiento de Zeeman, calculó en un caso sencillo qué efecto tendría si un campo magnético actuara sobre la fuente de luz. El resultado fue que la frecuencia original bien definida se separaría en dos o tres frecuencias distintas con un ensanchamiento que dependería de la razón e/m del ión. Lo que Zeeman había observado era un desdibujamiento, no una separación de las líneas, pero guiado por la predicción de Lorentz, encontró las líneas separadas en experimentos posteriores. Además, a partir del ensanchamiento observado, se encontró un valor de e/m notablemente grande a partir de la teoría de Lorentz; en concreto, de un orden de magnitud 10^7 emu/g, o aproximadamente 1.000 veces el valor electrolítico del hidrógeno (1 emu, o unidad electromagnética, equivale a 10 culombios). Mientras que la primera reacción de Lorentz había sido considerar el valor «muy malo» para su teoría, se dio cuenta que teoría y experimento se podían reconciliar si los osciladores iónicos (los electrones) tuvieran esta razón e/m tan grande. Otro resultado importante se seguía del

análisis de Lorentz: que la polarización observada de los componentes requería que los osciladores estuvieran cargados negativamente.

El efecto Zeeman, junto con fenómenos tales como la conductividad eléctrica y las propiedades ópticas de los metales, llevaron a Lorentz y a otros a una noción más restringida y definida del electrón: ahora se veía cada vez más como una partícula subatómica y de carga negativa con una razón carga/masa unas mil veces superior al valor numérico del ión hidrógeno. Este valor tan grande podía significar, o bien una carga muy grande, o bien una masa muy pequeña, o una combinación de las dos. Antes del descubrimiento de Zeeman, Larmor había atribuido al electrón una masa comparable a la del átomo de hidrógeno; tras el descubrimiento, y justo antes de los experimentos de J. J. Thomson, estaba dispuesto a considerar un electrón mucho más pequeño que el átomo de hidrógeno. En unos pocos meses todo este asunto adquirió una nueva perspectiva gracias a los resultados obtenidos del estudio experimental de los rayos catódicos.

La primera partícula elemental

Como hemos visto, cuando J. J. Thomson llevó a cabo sus celebrados experimentos en 1897, el electrón era una partícula bien conocida, aunque hipotética. Sin embargo, esto no significa que Thomson descubriera experimentalmente lo que Lorentz y otros habían predicho teóricamente. La partícula de Thomson al principio se consideraba distinta a las versiones anteriores del electrón, e hicieron falta varios años para que las distintas imágenes confluyeran en una concepción del electrón singular y unificada.

La cuestión sobre la naturaleza de los rayos catódicos –¿eran procesos corpusculares o etéreos?– no se discutía mucho en Inglaterra hasta 1896, cuando el descubrimiento de Röntgen hizo que los rayos catódicos adquirieran prominencia. Fue sobre todo este descubrimiento el que hizo que Thomson asumiera el problema; por lo tanto, puede argumentase que no sólo la radiactividad se debe a los rayos X, sino que también el electrón, aunque de una manera menos directa. Convencido de que los rayos catódicos eran corpusculares, Thomson decidió medir su velocidad y su valor de e/m. En su primera serie de experimentos, midió las dos cantidades combinando la deflexión magnética con un método calorimétrico (termoeléctrico) de medir la energía cinética de los rayos. Ya que los experimentos indicaban que el valor de e/m era independiente tanto del material del cátodo como del gas en el tubo, sugirió que las partículas de los rayos catódicos eran constituyentes subatómicos universales de la materia. Por aquel entonces todavía no había deconstruido el experimento de Hertz, que era un argumento contra la hipótesis corpuscular. Pero esto no le preocupaba, puesto que estaba convencido de que Hertz había fallado porque el tubo de descarga no se había evacuado lo suficiente y que la falta de deflexión observada era resultado de la conductividad en el gas residual.

Fue sólo en un experimento posterior cuando Thomson probó su caso, deflectando electrostáticamente rayos catódicos en un tubo altamente vaciado. Manipulando los

rayos en un campo cruzado magnético y electrostático, tenía a su disposición otro método de determinar *e/m*; el resultado que obtuvo estaba de acuerdo con el del método original. En su famoso artículo publicado en *Philosophical Magazine* en octubre de 1897, Thomson reiteraba y amplificaba su conclusión anterior sobre la naturaleza y significación de los rayos catódicos. Primero, encontró que *e/m* era de un orden de magnitud de 10^7 emu/g, lo cual interpretó al principio como una combinación de una masa pequeña y una carga elevada. Pronto cambió de opinión y argumentó que la carga era igual a la unidad de carga electrolítica, lo cual significaba que la masa de la partícula de los rayos catódicos era unas 1.000 veces menor que la del átomo de hidrógeno. En segundo lugar, lanzó la arriesgada hipótesis, a partir de la escasa evidencia, de que la partícula era la constituyente de toda la materia, la *protyle* tanto tiempo buscada, «que tantos químicos han considerado favorablemente». Thomson sugirió que una disociación del átomo tenía lugar en el intenso campo eléctrico cerca del cátodo, en concreto que los átomos del gas (no del cátodo) se rompían en sus «átomos primordiales» constituyentes, «que por brevedad llamaremos corpúsculos». Para Thomson, la elucidación de la naturaleza de los rayos catódicos era importante sobre todo dentro del contexto de la teoría atómica: «En los rayos catódicos tenemos materia en un nuevo estado, un estado en el que la subdivisión de la materia se lleva mucho más allá que en estado gaseoso ordinario: un estado en el que toda la materia [...] es de una misma clase; esta materia es la sustancia de la cual todos los elementos químicos se construyen» (Davis y Falconer 1997, p. 169).

La afirmación de Thomson sobre la universalidad de los corpúsculos era una hipótesis arriesgada con sólo una base experimental escasa. Estaba lejos de ser una conclusión derivada inductivamente del experimento, pero era una conclusión para la cual Thomson estaba bien preparado. Durante muchos años, había considerado ideas similares a las de «muchos químicos» y existían sorprendentes similitudes entre sus corpúsculos subatómicos de 1897 y la teoría atómica de vórtices que había sostenido muchos años antes. Menos de un año antes de sus primeros experimentos sobre *e/m*, sugirió, en una discusión sobre la absorción de los rayos X, que «esto parece favorecer la idea de Prout de que los distintos elementos son compuestos de un elemento primordial» (Thomson 1896, p. 304). En lo tocante a la inspiración, la afirmación de su descubrimiento y el concepto del corpúsculo parecen deber poco a la teoría del electrón contemporánea. William Prout, Norman Lockyer y Crookes fueron más importantes que Larmor, Zeeman y Lorentz. La conclusión de Zeeman-Lorentz sobre los electrones subatómicos estaba de acuerdo con el punto de vista de Thomson, pero no influyó mucho sobre éste.

Thomson llamó a sus partículas primordiales «corpúsculos». Dado que el nombre de «electrón» ya se utilizaba y que la teoría del electrón iba de camino a convertirse en una rama de moda en física teórica, ¿por qué no llamó a las partículas con ese nombre? Para ser breves, Thomson no creía que su partícula fuera idéntica a la partícula de Lorentz-Larmor y enfatizó la diferencia escogiendo otro nombre. De acuerdo con Thomson, los corpúsculos de los rayos catódicos no eran etéreos –cargas sin materia, como dirían los teóricos del electrón– sino partículas materiales cargadas, proto-átomos de

naturaleza química. En su artículo de octubre de 1897, Thomson consideraba brevemente la posibilidad de someter a la materia corpuscular a «investigación química directa», pero rechazaba la idea porque la cantidad de sustancia corpuscular producida en un tubo de rayos catódicos era, con mucho, demasiado pequeña. La identificación de los corpúsculos con los electrones libres fue sugerida por primera vez por George FitzGerald, inmediatamente después de que Thomson anunciara su descubrimiento. De manera característica, FitzGerald consideraba la reinterpretación una ventaja porque «no supone que el electrón sea una parte constituyente del átomo, ni que estemos disociando átomos, ni que, en consecuencia, estemos siguiendo el camino de los alquimistas» (Falconer 1987, p. 273). Sin embargo, esto es exactamente lo que Thomson asumía. De acuerdo con él, los átomos no sólo se componían de corpúsculos, sino que también podían descomponerse en corpúsculos.

A Thomson se le conoce como el descubridor del electrón porque sugirió que los corpúsculos eran constituyentes subatómicos de la materia, partículas elementales; porque aportó alguna evidencia experimental a esta sugerencia; y porque sus contemporáneos y los físicos posteriores aceptaron y sustantivizaron esta afirmación. No descubrió el electrón simplemente midiendo el valor de e/m de los rayos catódicos. Estas medidas, más precisas que las de Thomson, las estaban llevando a cabo al mismo tiempo Emil Wiechert y Walter Kaufmann en Alemania. El primer resultado de Wiechert fue $e/m = 2 \times 10^7$ emu/g y Kaufmann obtuvo inicialmente unos 10^7 emu/g, lo cual, más avanzado el mismo año, mejoró a $1{,}77 \times 10^7$ emu/g. El valor medio de Thomson era $0{,}77 \times$ emu/g, a comparar con el valor moderno de $1{,}76 \times$ emu/g. Aunque Kaufmann, como Thomson, varió el material del cátodo y del gas en el tubo, no sugirió a partir de sus datos que los rayos catódicos fueran corpusculares. Wiechert sí lo hizo, pero no hizo las mismas amplias generalizaciones de su colega de Cambridge, y así perdió uno de los más importantes descubrimientos de la historia de la física.

La idea de Thomson sobre corpúsculos o electrones recibió pronta confirmación gracias al estudio de una amplia variedad de fenómenos. Electrones con valores de e/m aproximadamente como los sugeridos por Thomson se detectaron en fotoelectricidad, radioactividad beta y fenómenos termoiónicos, y fueron inferidos en magnetoóptica, conducción metálica y reacciones químicas. Para asentar la cuestión de la masa del electrón, su carga debía determinarse. Esto se llevó a cabo en los años finales del siglo por Thomson y sus asociados del laboratorio Cavendish, especialmente Charles T. R. Wilson y John Townsend. En 1899, había obtenido un valor cercano al del hidrógeno en la electrólisis, lo cual correspondía a una masa de electrón 700 veces menor que la del átomo de hidrógeno. Durante el mismo corto periodo el concepto del electrón se estabilizó y a finales de siglo la identificación corpúsculo-electrón se aceptaba generalmente y se olvidó la resistencia inicial de Thomson a la idea. Thomson se quedó casi solo utilizando el término «corpúsculo» para lo que otros físicos denominaban electrón. Por aquel entonces, concebía que la masa de las partículas era electromagnética, lo cual ayudó a formar una visión de consenso del electrón. El electrón se había convertido en una partícula madura, pero otros cambios aguardaban en el futuro.

Otra importante consecuencia de los sucesos entre 1896-1900 fue una aceptación general de una asimetría entre cargas positivas y negativas. El electrón de Zeeman era negativo, y también el corpúsculo de Thomson. Los electrones positivos de teorías electrónicas anteriores se convirtieron en partículas hipotéticas y se abandonaron durante los primeros años del siglo XX. Unos poco físicos mantuvieron haber encontrado evidencia de electrones positivos, pero sus afirmaciones no se tomaron muy en serio. «Si hay una cosa que la investigación reciente sobre electricidad ha establecido», escribió Norman Campbell en 1907 en su Modern Electrical Theory, «es la diferencia fundamental entre electricidad positiva y negativa» (Kragh 1989b, p. 213). Para resumir, el electrón de principios del siglo XX tenía carga negativa y una masa sobre una milésima la del átomo de hidrógeno; la masa se pensaba que tenía un origen parcial o totalmente electromagnético. El electrón podía existir libremente o estar ligado a la materia y se reconocía como un constituyente de todos los átomos, quizá incluso el único constituyente.

CAPÍTULO 4

Arquitectura atómica

El átomo de Thomson

Se pueden encontrar ideas especulativas sobre la constitución de los átomos muchas décadas antes del descubrimiento del electrón, pero sólo con la nueva partícula adquirieron los modelos atómicos un estatus más realista. El electrón se aceptó generalmente como un bloque constituyente de la materia, lo cual condujo directamente al primer modelo elaborado del interior del átomo. El importante modelo del «pudín de ciruelas» de Thomson, consistente en electrones mantenidos en posiciones de equilibrio por un fluido positivo, se enunció por primera vez en su artículo de 1897, pero estaba en deuda con trabajos llevados a cabo muchos años antes.

Una de las fuentes importantes era la teoría atómica de vórtices, de acuerdo con la cual los átomos se concebían como vórtices en un fluido perfecto que invadía todo. Otra fuente fue un experimento que realizó el físico estadounidense Alfred M. Mayer en 1878. Mayer sometió a agujas imantadas idénticamente que flotaban en agua a la fuerza atractiva de un electroimán central y observó que las agujas asumían posiciones de equilibrio en círculos concéntricos. Lord Kelvin (entonces todavía William Thomson) se dio cuenta inmediatamente de que el experimento proporcionaba una buena analogía con la teoría atómica de vórtices. La analogía fue asumida por el joven J. J. Thomson en su ensayo ganador del premio Adams de 1883, donde se ocupó con gran detalle matemático de la teoría de vórtices de Kelvin. En este trabajo, Thomson (a partir de ahora, «Thomson» se referirá a J. J.) examinó teóricamente la estabilidad de un número de vórtices dispuestos en intervalos iguales alrededor de la circunferencia de un círculo. Para más de siete vórtices, donde los cálculos se volvían altamente complejos, refería a los experimentos de Mayer con imanes como guía. Thomson asumió que sus vórtices elementales eran de la misma fuerza, lo cual no sólo simplificaba los cálculos sino que también estaba de acuerdo con su inclinación hacia una teoría monista de la materia. Hay una clara analogía entre su distribución de vórtices de 1883 y su distribución de

electrones posterior. Aunque Thomson, como la mayoría de los otros físicos, abandonara la teoría atómica de vórtices sobre 1890, la idea le siguió atrayendo. En 1890 enlazó el sistema periódico de los elementos con el modelo atómico de vórtices y señaló la sugerente similitud entre una distribución de vórtices en columnas y la regularidad que se encontraba entre los elementos químicos: «Si imaginamos que las moléculas [átomos] de todos los elementos están compuestas del mismo átomo primordial [partícula elemental], e interpretamos que un número atómico ascendente indica un incremento en el número de estos átomos, entonces, desde este punto de vista, según se incrementa continuamente el número de átomos, ciertas peculiaridades en la estructura serán recurrentes» (Kragh 1997b, p. 330). Claramente, Thomson se inclinaba por concebir el átomo como un sistema compuesto de elementos primordiales años antes del descubrimiento del electrón.

En su artículo de octubre de 1897, Thomson sugirió que los átomos consistían en un gran número de corpúsculos (electrones), que posiblemente se mantenían juntos por una fuerza central. Apoyándose en el experimento de Mayer, indicó que la configuración de electrones era una estructura anular y que tal configuración podría explicar el sistema periódico. En esta primera versión del modelo de Thomson, la imagen del átomo era simplemente un agregado de electrones y «huecos», así pues, suponiendo fuerzas de Coulomb entre los electrones, no existía fuerza atractiva que impidiera que el átomo explotara. Dos años después, Thomson presentó una hipótesis más definitiva, en la cual formulaba explícitamente lo que pronto pasaría a conocerse como el modelo atómico de Thomson: «Considero que el átomo contiene un gran número de cuerpos más pequeños, los cuales llamaré corpúsculos [...] En el átomo normal, este agregado de corpúsculos forma un sistema que es eléctricamente neutro. Aunque los corpúsculos individuales se comportan como iones [cargas] negativos, aun así, cuando están agregados en un átomo neutral el efecto negativo está compensado por algo que causa que el espacio a través del cual los corpúsculos están repartidos actúe como si tuviera una carga de electricidad positiva igual en cantidad a la suma de las cargas negativas en los corpúsculos» (Kragh 1997b, p. 330). Thomson empezó a desarrollar un modelo cuantitativo a partir de esta idea sólo en 1903, poco después de que tuviera conocimiento de un modelo en cierto modo similar propuesto por Lord Kelvin.

La esencia del modelo atómico clásico de Thomson, según se presentaba en libros y artículos entre 1904 y 1909, era ésta: por razones de simplicidad, Thomson restringía su análisis sobre todo a anillos rotatorios de electrones restringidos a un plano y sujetos a la fuerza elástica debida a una esfera homogénea de electricidad positiva. Mediante cálculo directo, examinaba la estabilidad mecánica de las configuraciones de equilibrio, rechazando aquellas que no fueran estables. Los complicados cálculos de estabilidad de Thomson eran bastante similares a los que había utilizado en su trabajo sobre el átomo-vórtice más de veinte años antes. Los complejos cálculos, los cuales suplían con un método más aproximado para un número mayor de electrones, mostraban que los electrones estarían dispuestos en una serie de anillos concéntricos de tal manera que el número de partículas en un anillo se incrementaría con el radio del ani-

llo. Ejemplos de sus configuraciones de equilibrio de 1904 son 1, 8, 12, 16 para $n = 37$ y 1, 8, 12, 16, 19 para $n = 56$. Los electrones acelerados emitirían energía electromagnética, y Thomson tuvo, por lo tanto, que asegurarse de que sus átomos no fueran inestables radiativamente y se colapsaran. Aplicando una fórmula derivada por Larmor en 1897, pudo mostrar que la radiación crecía drásticamente con el número de electrones en los anillos y podía, por lo tanto, a todos los efectos, ignorarse. El átomo original de Thomson era estable mecánicamente, además de ser radiativamente estable.

Thomson se dio cuenta de que su modelo plano del átomo debería generalizarse a un modelo esférico, pero no veía razón para embarcarse en los cálculos hercúleos que tal extensión requeriría. Después de todo, el número de electrones en los átomos reales era desconocido, así que una comparación detallada con las propiedades fisicoquímicas de los elementos se podía descartar. El modelo era sin duda el modelo atómico más popular en el periodo 1904-1910, cuando muchos físicos lo consideraban una buena aproximación de la verdadera constitución de los átomos. En una clase en Gotinga en 1909, Max Born la alabó diciendo que «es como un extracto para piano tomado de las grandes sinfonías de los átomos luminosos». Rutherford y Lorentz también consideraban que el modelo era atractivo y lo utilizaron en sus propios trabajos. Las características atractivas del modelo estaban particularmente relacionadas con su naturaleza monista, que prometían una reducción de toda la materia a electrones, de acuerdo con el punto de vista electromagnético. Además, los cálculos de Thomson dotaron al modelo de una gran autoridad matemática, aunque la mayoría de los físicos prestaron poca atención a los detalles de las configuraciones electrónicas. En lo tocante a credenciales empíricas, sin embargo, el modelo era menos impresionante. Era capaz de explicar, de una manera cualitativa y vaga, fenómenos como la radiactividad, fotoelectricidad, dispersión, emisión de luz, efecto Zeeman normal, y, no menos importante, el sistema periódico. De manera adicional, prometía iluminar muchos hechos químicos y era, por este motivo, popular entre muchos químicos. Pero en la mayoría de los casos, las explicaciones eran analogías sugerentes más que deducciones basadas en los detalles del modelo.

Era evidente desde el principio que el modelo de Thomson era problemático, tanto conceptual como empíricamente. Uno de los puntos débiles era la electricidad positiva, supuestamente sin fricción ni masa, y a la postre una manifestación de los electrones negativos. Como Thomson escribió a Oliver Lodge en 1904, «siempre he tenido la esperanza (todavía no satisfecha) de ser capaz de arreglármelas sin electrificación positiva como una entidad separada, y reemplazarla por alguna propiedad de los corpúsculos. [...] Uno presiente, yo creo, que la electrificación positiva al final acabará siendo superflua y que será posible obtener los efectos que ahora le atribuimos a ella de alguna propiedad de los corpúsculos» (Dahl 1997, p. 324). Thomson nunca consiguió explicar la electricidad positiva como un epifenómeno. Por el contrario, a partir de distintas clases de evidencia experimental, concluyó en 1906 que el número de electrones era comparable al peso atómico, una conclusión que se aceptó pronto en general. Durante unos pocos años posteriores, un cuerpo de creciente de pruebas indicaba

que el número podía ser incluso menor, posiblemente correspondiente al número de ordenación en el sistema periódico. Esta conclusión era molesta, ya que entonces la esfera positiva debería responder de la mayor parte de la masa del átomo, lo cual contradecía la concepción electromagnética de la masa. (La inercia electromagnética varía inversamente con el radio de la carga y, por tanto, debería ser despreciable para un cuerpo de dimensiones atómicas.) No es sorprendente que Lodge llamara a la estimación de Thomson sobre el número de electrones «el más serio golpe propinado por ahora a la teoría eléctrica de la materia».

El pequeño número de electrones resultaba un problema no sólo para la visión electromagnética de la materia, sino también, y en particular, para la credibilidad del modelo de Thomson. En 1904 Thomson no necesitaba una comparación exacta entre sus átomos modelo y los que realmente existían, ya que con varios miles de electrones hasta en los átomos más ligeros no había manera en la cual tal comparación pudiera establecerse. Alrededor de 1910, había buenos motivos para creer que el átomo de hidrógeno contenía sólo un electrón, en átomo de helio dos, tres o cuatro, etcétera; esto significaba que los cálculos del modelo de Thomson no se podían confrontar con las propiedades químicas y físicas de los elementos reales. En el caso de los elementos más ligeros, ya no se podía argumentar que el número de electrones era demasiado grande o que los cálculos tridimensionales no eran posibles técnicamente. Aunque Thomson continuó como si el problema no existiera, estaba claro que la deseada correspondencia entre el modelo y la realidad simplemente no existía.

Había otros problemas de una naturaleza más empírica. En particular, el modelo de Thomson era incapaz de explicar, sin suposiciones artificiales, las conocidas regularidades de los espectros de líneas, como la ley de Balmer. En efecto, la mayoría de los espectros parecían plantear problemas, ya que de acuerdo a Thomson, la luz se emitía por las vibraciones de los electrones y esto requería que el número de electrones fuera del mismo orden que el número de líneas espectrales observadas. ¿Cómo podían entenderse los miles y miles de líneas halladas en muchos espectros metálicos a partir de las vibraciones de cien o menos electrones?

Nuevos experimentos añadieron problemas al átomo de Thomson. Thomson explicaba la dispersión de las partículas beta asumiendo dispersión múltiple, es decir, que la dispersión observada era el resultado colectivo de muchas dispersiones individuales en los electrones atómicos. Sobre esta base, consiguió explicar de manera bastante satisfactoria los datos experimentales. Pero la teoría de dispersión de Thomson fallaba cuando se confrontaba con los resultados de los experimentos sobre dispersión alfa. Por otro lado, éstos se explicaban muy bien mediante la idea de Rutherford de un núcleo atómico; por esta razón, los experimentos de dispersión alfa se han contemplado tradicionalmente como el examen crucial entre las dos teorías de estructura atómica. Sin embargo, podría llevar a confusión considerar que la caída del átomo de Thomson simplemente se debe al resultado de los experimentos sobre dispersión alfa de Manchester. Una teoría no se refuta sólo porque deje de explicar algunos experimentos. La refutación de la teoría atómica de Thomson fue un proceso gradual, durante el cual se

acumularon anomalías y se fue haciendo más y más evidente que el modelo no se podía desarrollar hacia un estado satisfactorio. Sobre 1910, antes de que Rutherford propusiera su núcleo atómico, el modelo de Thomson había perdido gas y ya no se consideraba atractivo por la mayoría de los físicos. Unos pocos, incluyendo Erich Haas en 1910 y Ludwig Föppl en 1912, continuaron investigando el modelo, pero las investigaciones eran principalmente matemáticas y no tenían relevancia para los átomos reales que estudiaban los experimentales. En un trabajo de 1910, Haas, un físico austriaco, sugirió relacionar la constante de Planck con las dimensiones de un átomo de hidrógeno de Thomson. Utilizando algunas suposiciones bastante arbitrarias, obtuvo fórmulas para la constante de Planck y la de Rydberg en términos del tamaño del átomo y la masa y carga del electrón. Su modelo fue el primer intento de aplicar la teoría cuántica a la estructura de los átomos, pero el enfoque de Haas era esencialmente clásico: quería explicar el cuanto de acción en términos de la teoría atómica en vez de explicar la estructura del átomo mediante la teoría cuántica.

En el segundo Congreso de Solvay en 1913, los físicos asistieron a los últimos coletazos del modelo atómico de Thomson. Thomson aplicó un modelo convenientemente modificado para explicar tanto la dispersión alfa como la relación lineal entre la energía de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz incidente que los experimentos indicaban. Suponiendo que la densidad de carga de la esfera positiva decrece desde el centro, y haciendo otras suposiciones *ad hoc,* consiguió obtener la ley fotoeléctrica con la constante de Planck expresada en términos de la carga y la masa del electrón. Sin embargo, todo el procedimiento era tan *ad hoc* y artificial que les debería haber parecido a sus oyentes lo que era: un último intento de salvar un modelo atómico que una vez fue útil y de evitar las características no clásicas de la teoría cuántica. Pocos, por no decir ninguno, de los físicos reunidos en Bruselas quedaron convencidos de que el átomo de Thomson merecía sobrevivir.

Otros modelos atómicos tempranos

Aunque el modelo de Thomson era con mucho el modelo atómico más importante de la primera década del siglo, no era el único. El reconocimiento del electrón como un constituyente universal de la materia estimuló que los físicos propusieran una variedad de modelos, la mayoría de corta vida y algunos meras especulaciones. Fue sobre todo en Gran Bretaña donde estos modelos atómicos tuvieron su origen y fueron debatidos. En Europa y en América del Norte, el interés por la estructura atómica era limitado. La inclusión de los electrones era común a todos los modelos; lo que los distinguía eran las propuestas de cómo distribuir la necesaria carga positiva. La sugerencia de Thomson de colocar los electrones en una esfera de fluido positivo fue hecha independientemente por Kelvin en 1901. El modelo de Kelvin tenía evidentemente mucho en común con el de Thomson, pero era más cualitativo y no utilizaba el concepto moderno de electrón. Kelvin prefería llamar a sus partículas negativas «electriones», posiblemente para distinguirlas de los electrones de Thomson, Lorentz y Lar-

mor. En artículos escritos entre 1902 y 1907, el anciano Kelvin (que murió en 1907 a los 83 años) aplicó su modelo a una variedad de fenómenos, incluyendo la radiactividad, la cual pensaba que era activada por un agente externo, quizá ondas etéreas. Introduciendo fuerzas no coulombianas en su modelo, consiguió evitar, para su gran satisfacción, la «totalmente imposible» conclusión de que la radiactividad era energía almacenada en los átomos. Las ideas de Kelvin fueron educadamente ignoradas por otros físicos británicos.

El modelo de Kelvin-Thomson fue una de las hipótesis sobre estructura atómica que Lodge incluyó en su libro de 1906 *Electrons*. Otro era la idea de que los átomos «consisten en una especie de mezcla entrelazada de electricidad positiva y negativa, indivisible e inseparable en unidades». Ésta era la imagen del átomo que Lenard favorecía, de acuerdo a quien las estructuras básicas era «dinámidos» en rápida rotación, una especie de doblete eléctrico. Lenard desarrolló la idea en varios trabajos entre 1903 y 1913, pero no consiguió atraer el interés de otros físicos. Otra de las hipótesis candidatas de Lodge era que «el grueso del átomo podría consistir en una multitud de electrones positivos y negativos, entremezclados, podríamos decir, y sujetos en un agregado por sus atracciones mutuas» (p. 148). Aunque se aceptaba generalmente que los electrones positivos no existían, en 1901 James Jeans propuso sin embargo esta imagen para explicar el mecanismo de los espectros de líneas. Con el objeto de evitar la objeción de que no existe ningún sistema en equilibrio para un sistema de partículas cargadas, Jeans sugirió que la ley de Coulomb debería fallar para distancias muy cortas. Impertérrito por las medidas de los experimentales de la carga y masa del electrón, Jeans consideró un átomo ideal en el cual había un número casi infinito de electrones (prácticamente sin masa) concentrados en la capa exterior del átomo. Los electrones positivos estarían de manera efectiva, y conveniente, escondidos dentro del átomo. Mediante estas suposiciones arbitrarias, y algunas otras, consiguió derivar líneas espectrales semejantes a las observadas. Un modelo bastante similar fue propuesto por Lord Rayleigh cinco años después, de nuevo con el solo propósito de calcular frecuencias espectrales. En todos los modelos atómicos de 1913, la emisión de luz se suponía el resultado de electrones vibrantes. Es interesante notar que Rayleigh, al final de su artículo, consideró la posibilidad de que «las frecuencias observadas en el espectro podrían no ser en absoluto frecuencias de perturbación o de oscilaciones en el sentido habitual, sino más bien formar una parte esencial de la constitución original del átomo según sería determinada por condiciones de estabilidad» (Conn y Turner 1965, p. 125). Sin embargo, no desarrolló la sugerencia, la cual formaría más tarde una parte crucial del átomo cuántico de Bohr.

Otro tipo de modelos atómicos mencionados por Lodge era la imagen del átomo como una especie de sistema solar, con los electrones orbitando («como asteroides») alrededor de un centro de electricidad positiva concentrada. La primera sugerencia de este tipo fue anunciada por el químico y físico francés Jean Perrin en un popular artículo de 1901. Perrin sugirió que el modelo podría explicar la radiactividad y emisión de luz, pero la sugerencia era puramente cualitativa y no prestó atención al problema

de la estabilidad de su átomo planetario. La analogía micro-macro entre átomos y sistemas solares o galácticos era popular por aquel entonces y parece haber sido una de las principales razones por las que los modelos atómicos planetarios recibieron alguna atención. El intento más elaborado fue el de Hantaro Nagaoka, cuyo modelo «saturnino» fue publicado en 1904, en el mismo volumen de *Philosophical Magazine* en el que apareció la teoría de Thomson. El modelo de Nagaoka tenía inspiración astronómica, en el sentido de que se apoyaba fuertemente en el análisis de Maxwell de 1856 sobre la estabilidad de los anillos de Saturno. El físico japonés suponía que los electrones estaban colocados uniformemente sobre anillos que se movían alrededor del centro atractivo de un núcleo positivo. Como Thomson y todos los otros constructores de modelos, Nagaoka protegió sus conclusiones añadiendo que «la disposición real en un átomo químico puede presentar complejidades que están mucho más allá del alcance del tratamiento matemático» (Conn y Turner 1965, p. 113). Los cálculos de Nagaoka conducían a sugerentes fórmulas espectrales y a una explicación cualitativa de la radiactividad. Sin embargo, fueron severamente criticados por George A. Schott, un físico británico, que argumentó que las suposiciones de Nagaoka eran inconsistentes y que el modelo no podía conducir al acuerdo con los datos experimentales que se afirmaba. El modelo saturnino desapareció del panorama y sólo reapareció, en una forma totalmente distinta, con la teoría nuclear de Rutherford.

En 1911 John W. Nicholson, un físico-matemático del laboratorio Cavendish, sugirió un modelo atómico algo similar al de Nagaoka. El ambicioso objetivo de Nicholson era derivar todos los pesos atómicos de los elementos químicos a partir de combinaciones de proto-átomos, los cuales, suponía, existían solamente en las estrellas. Consideraba que la carga positiva era de origen electromagnético, por lo tanto, mucho, más pequeña que el electrón, y que estaba situada en el centro del átomo. Los electrones rotaban en esferas alrededor del núcleo (como él llamaba a la carga central). Al contrario de la mayoría de los demás constructores de modelos, Nicholson intentaba dar cuenta de la estructura de los átomos reales, si bien utilizando hipotéticos proto-átomos. Así, en su esquema, el hidrógeno contenía un anillo de tres electrones, con el proto-átomo más sencillo, que era el sistema de dos electrones, que él llamaba «coronio». Mediante varias suposiciones, conseguía explicar los pesos atómicos de la mayoría de los elementos. Como Haas antes que él, Nicholson introdujo conceptos de la teoría cuántica de Planck para explicar los espectros de líneas. Acabó llegando a una explicación atómica de la constante de Planck y a la conclusión de que el momento angular de los proto-átomos debía ser un múltiplo de esta constante. Es decir, llegó a la regla de cuantización $L = nh/2\pi$. Esto puede parecer muy similar al razonamiento de Bohr de dos años después, pero el modelo de Nicholson no era realmente una teoría cuántica del átomo. Se fundaba en la mecánica clásica y el electromagnetismo y estaba mucho más cercano al enfoque de Thomson que al de Bohr. Nicholson continuó desarrollando su teoría en artículos entre 1911 y 1914 y recibió cierta respuesta positiva de otros físicos británicos. Sin embargo, sobre 1915 era evidente que el modelo de Nicholson pertenecía al pasado y no al futuro.

El átomo nuclear de Rutherford

Durante sus fértiles años en Montreal de 1898 a 1907, Ernest Rutherford no estaba particularmente interesado en modelos atómicos. En la medida en la que expresaba interés, estaba generalmente a favor de la teoría de Thomson, la cual encontraba útil para entender fenómenos radiactivos. Fue sólo en 1910 cuando Rutherford se volcó seriamente en la teoría atómica, principalmente como resultado de su profundo interés en el comportamiento y la naturaleza de las partículas alfa. En 1908 había mostrado de manera precisa que la partícula alfa era idéntica a un ión de helio doblemente cargado. El mismo año, Hans Geiger, un físico alemán que trabajaba con Rutherford en Manchester, anunció resultados preliminares sobre la dispersión de partículas alfa por láminas metálicas. Geiger notó una dispersión apreciable; el año siguiente investigó el asunto con más detalle en una colaboración con Ernest Marsden, entonces un estudiante de carrera de veinte años. Encontraron que los metales pesados eran mucho más efectivos como reflectores que los ligeros y que una lámina de aluminio delgada reflejaba (esto es, dispersaba, más de 90°) una de cada 8.000 partículas alfa que chocaban contra ella. Cuando Rutherford supo de estos resultados, se dice que lo consideró «el suceso más increíble que me ha ocurrido en mi vida [...] casi tan increíble como si dispararas un proyectil de 40 centímetros a una hoja de papel y se volviera para impactar contigo». Rutherford hizo esta observación frecuentemente citada en 1936, pero no pudo haber sido su manera de reaccionar en 1909-1910. El comentario tiene sentido desde la perspectiva de un núcleo atómico casi vacío, pero Rutherford no tenía esta idea en 1909, cuando todavía consideraba al átomo como algo lleno, al estilo de Thomson. En cualquier caso, los experimentos indujeron a Rutherford a investigar la dispersión de las partículas alfa y comparar los resultados con la teoría de Thomson sobre la dispersión de las partículas beta. Esta teoría, de acuerdo a la cual los electrones beta se dispersaban múltiples veces en pequeños ángulos debido a los electrones atómicos, parecía concordar bien con los experimentos que sugerían que el número de electrones era aproximadamente tres veces el peso atómico.

Según Thomson, la partícula alfa tenía dimensiones atómicas y contenía unos diez electrones. Rutherford, por otro lado, creía que la partícula alfa debía considerarse una partícula puntual, como el electrón. Como la partícula alfa era un átomo de helio desprovisto de dos electrones, este punto de vista implicaba, de hecho, un modelo nuclear del átomo de helio. Rutherford alcanzó esta importante conclusión antes de desarrollar su teoría de la dispersión, la cual se apoyaba en su idea de partículas alfa puntuales. La teoría que Rutherford presentó en 1911 tenía su base experimental en las observaciones de Geiger-Marsden de dispersión hacia ángulos grandes, que Rutherford encontraba incompatibles con la teoría de Thomson de múltiples dispersiones por electrones. Para producir las deflexiones observadas de más de 90°, la dispersión debía tener lugar en un único encuentro entre la partícula alfa y una masa altamente cargada y concentrada. Rutherford por lo tanto sugirió que el átomo consistía en una carga masiva Ze rodeada por una nube de electricidad opuesta. Ya que los resultados de sus cálculos eran independientes del signo de la carga, el núcleo podría ser perfectamente

una concentración de electrones inmersa en un fluido positivo, algo similar a un caso especial del átomo de Thomson. En palabras de Rutherford: «Consideremos un átomo que contiene una carga ± *Ne* en su centro rodeado por una esfera de electrificación que contiene una carga –*Ne* que suponemos uniformemente distribuida sobre una esfera de radio *R* [...] por conveniencia el signo [de la carga central] se supondrá positivo» (Conn y Turner 1965, p. 138). Basándose en su imagen nuclear del átomo, Rutherford derivó la famosa fórmula de dispersión, que proporciona la dependencia de la probabilidad de dispersión (sección eficaz) en el ángulo de dispersión, la energía de las partículas alfa que incidían, y el grosor y carga del material que dispersaba.

El átomo nuclear de Rutherford se reconoce con justicia como un hito en la historia de la física. Sin embargo, un observador de 1911 ó 1912 jamás lo habría pensado. Cuando el modelo se introdujo en la primavera de 1911, encontró indiferencia y escasa consideración de que fuera una teoría sobre la constitución del átomo. La nueva concepción del átomo no se mencionó en las actas del congreso Solvay de 1911 (en el cual Rutherford participó) ni fue ampliamente debatido en las revistas de física. Al parecer, ni siquiera el mismo Rutherford consideraba que el núcleo atómico tuviera gran importancia. Por ejemplo, en su libro de texto sobre radiactividad de 1913, titulado *Sustancias radiactivas y sus radiaciones,* sólo el 1 por 100 de las 700 páginas del libro trata del nuevo descubrimiento y sus implicaciones. El núcleo era pequeño pero, según Rutherford, no puntual. Por el contrario, Rutherford lo imaginaba como un cuerpo altamente complejo mantenido por lo que acabarían llamándose fuerzas nucleares: «Prácticamente toda la carga y masa del átomo están concentradas en el centro, y están probablemente confinadas en una esfera de radio no mayor de 10^{-12} cm. Sin duda el centro positivamente cargado del átomo es un complicado sistema de movimiento, consistente en parte en átomos de helio e hidrógenos cargados. Parecería como si los átomos de materia positivamente cargados se atrajeran entre sí a distancias muy cortas ya que de otro modo es difícil ver cómo las partes constitutivas del centro se mantienen juntas» (p. 620).

Había buenas razones para la falta inicial de interés en el núcleo atómico, ya que Rutherford presentaba su teoría principalmente como una de dispersión, y sólo secundariamente como una atómica. Como teoría de dispersión, tenía un éxito moderado, pero su apoyo experimental era limitado e indirecto; y como teoría atómica, era incompleta y podía aparecer incluso *ad hoc* de modo irremediable. Rutherford había argumentado a partir de datos de dispersión que la masa del átomo estaba concentrada en un núcleo minúsculo, pero no podía ofrecer sugerencias sobre cómo estaban dispuestos los electrones. Por razones de simplicidad, suponía que la electricidad negativa formaba una atmósfera homogénea alrededor del núcleo, pero dado que los electrones no tenían importancia en la dispersión, esta imagen era simplemente arbitraria. «No es necesario considerar la cuestión de la estabilidad del átomo propuesto en esta etapa», escribió, «ya que esto dependerá obviamente de la estructura detallada del átomo, y del movimiento de las partes cargadas constituyentes» (Conn y Turner 1965, p. 138). Rutherford no sugirió un átomo planetario en 1911, y su modelo era por lo

tanto completamente impotente en lo tocante a cuestiones químicas como el enlace y la tabla periódica. Tampoco era mucho mejor en lo concerniente a cuestiones físicas, tales como regularidades espectrales y dispersión. La característica que definía al modelo de Rutherford, el núcleo atómico, ni siquiera era nueva, puesto que ya se habían propuesto modelos nucleares. Nicholson, que sugirió independientemente su propio modelo nuclear, consideraba al de Rutherford meramente «un resurgimiento de una sugerencia de Nagaoka de un sistema atómico saturnino sencillo, involucrando sólo un único núcleo positivo» (Heilbron 1968, p. 303). Por cierto, Rutherford escribió originalmente sobre una «carga central»; la palabra «núcleo» parece haber sido utilizada primero por Nicholson.

El destino del modelo atómico de Rutherford cambió en 1913, cuando Geiger y Marsden publicaron nuevos datos sobre la dispersión de partículas alfa, incluyendo un recuento total de cien mil escintilaciones. Sus datos estaban en excelente acuerdo con la fórmula de dispersión de Rutherford y proporcionaban «fuerte evidencia de lo correcto de las suposiciones subyacentes de que un átomo contiene una carga fuerte en el centro de dimensiones, pequeñas comparadas con el diámetro el átomo» (Stehle 1994, p. 221). Aun así, esto era sólo una confirmación del modelo atómico de Rutherford visto como una teoría de la dispersión, no de otros aspectos del modelo. Los resultados de Geiger-Marsden eran tan irrelevantes para las configuraciones electrónicas como el modelo de Rutherford silencioso para ellas. Una teoría atómica era considerada realmente convincente sólo si incluía el sistema electrónico. Después de todo, era esta parte del átomo la que era responsable de la gran mayoría de los fenómenos atómicos que podían ser probados experimentalmente. Este importante aspecto, ausente del trabajo de los físicos de Manchester, fue proporcionado de manera inesperada por un joven físico danés que transformó la imagen de Rutherford del átomo nuclear en una teoría apropiada del átomo nuclear.

Una teoría cuántica de la estructura atómica

Niels Bohr no estaba interesado en la teoría atómica al principio; escribió su tesis doctoral sobre la teoría electrónica de los metales y encontró que esta teoría, según estaba desarrollada por Lorentz, J. J. Thomson y otros, era insatisfactoria tanto en sus detalles como en sus principios. «La causa del fallo es muy probablemente ésta: que la teoría electromagnética no está de acuerdo con las condiciones reales en la materia», escribió en su tesis de 1911, publicada sólo en danés. Bohr sugirió que se debían introducir restricciones no mecánicas, o lo que él denominaba «fuerzas en la naturaleza de un tipo completamente distinto de la clase mecánica usual», para hacer que la teoría electrónica de los metales estuviera de acuerdo con la naturaleza interna de los átomos. Pero en 1911 no consideró la estructura atómica y no tenía una idea clara del tipo de restricción o hipótesis que se necesitaba. Pasó el año académico 1911-1912 en Inglaterra, primero con J. J. Thomson en Cambridge y luego con Rutherford en Manchester, al principio continuando sus estudios de la teoría electrónica de los metales

pero pronto concentrándose en la nueva imagen del átomo que Rutherford había propuesto y que Bohr encontró altamente atractiva. Se dio cuenta de que el átomo nuclear necesitaba completarse con una estructura electrónica y que esto requeriría alguna hipótesis no mecánica para hacer al átomo estable. El pensamiento de Bohr tuvo como resultado el «memorando de Manchester», un documento del verano de 1912 en el cual comunicó sus ideas a Rutherford. En este memorando, Bohr sugirió que el átomo se estabilizaría mecánicamente si la energía cinética de los electrones orbitales estuviera confinada a ser proporcional a sus frecuencias de rotación. Como constante de proporcionalidad, escogió una cantidad cercana a la constante de Planck. En esta etapa, Bohr estaba preocupado por la estabilidad mecánica, no por la electrodinámica.

En el memorando de Manchester, Bohr se ocupó de configuraciones electrónicas, moléculas y volúmenes atómicos, pero no de espectros. «No me ocupo en absoluto de la cuestión del cálculo de las frecuencias correspondientes a las líneas en el espectro visible», escribió a Rutherford el 31 de enero de 1913, contrastando su teoría con la de Nicholson (Bohr 1963, p. xxxvii). Poco después, un colega en Copenhague le preguntó cómo se relacionaban sus ideas con la fórmula de Balmer para las líneas del hidrógeno, con la cual Bohr, de manera bastante sorprendente, no parecía familiarizado, o de la cual quizá se había olvidado. La pregunta fue reveladora y Bohr inmediatamente se dio cuenta de cómo sus ideas podían ser extendidas para proporcionar una explicación de los espectros discretos. Su gran artículo «On the Constitution of Atoms and Molecules» apareció en tres partes en la *Philosophical Magazine* en el verano y otoño de 1913. El átomo de hidrógeno era el objeto de la primera parte, donde introdujo sus famosos postulados, que son: (1) la noción de estados estacionarios, donde la mecánica ordinaria es válida pero la electrodinámica es inválida y (2) la suposición de que la radiación se emite o absorbe cuando el átomo pasa de un estado estacionario a otro. El proceso de transición no se podía entender de manera clásica, señaló Bohr, «pero parece ser necesario para dar cuenta de los hechos experimentales».

Notablemente, e inspirado por la teoría de Planck, Bohr supuso que la frecuencia de la luz (ν) no estaba relacionada directamente con las frecuencias de los electrones orbitales, sino que estaba dada por la diferencia de energías entre dos estados estacionarios por la ecuación $E_i - E_f = h\nu$. A partir de esta suposición básica, Bohr consiguió derivar la fórmula de Balmer para las frecuencias del espectro del hidrógeno de una manera bien conocida gracias a los libros de texto básicos de física. La derivación no reproducía meramente una ley empírica conocida, sino que también proporcionaba una expresión de la constante de Rydberg en términos de constantes microfísicas de la naturaleza, en concreto, la carga y masa del electrón y la constante de Planck. El resultado de Bohr fue $\nu = Rc(1/n^2 - 1/m^2)$, siendo $R = 2Z^2\pi^2me^4/h^3$ y n y m son números cuánticos enteros que caracterizan los estados estacionarios; Z es la carga nuclear, 1 para el hidrógeno. En el verano de 1913, las líneas que estaban de acuerdo con la fórmula se conocían como $n = 2$ (serie de Balmer) y $n = 3$ (serie de Paschen); Bohr predijo la existencia de líneas adicionales correspondientes a $n = 1$ y n mayor que 4, «series respectivamente en el ultravioleta extremo y el ultra-rojo extremo que no se han

observado, pero cuya existencia puede esperarse». Esta seguridad se vio justificada cuando Theodore Lyman anunció en 1914 líneas de acuerdo con $n = 1$. El potencial de ionización de un átomo de hidrógeno en su estado base ($n = 1$) se seguía directamente de la expresión de Balmer. Bohr obtuvo un valor de unos 13 voltios, lo cual comparó con la estimación experimental de J. J. Thomson de 11 voltios. (Medidas posteriores y más precisas estuvieron en completo acuerdo con el valor de Bohr.) Para el radio de un átomo de hidrógeno en su estado base, lo que se conocería más tarde como el radio de Bohr, obtuvo 0,55 ángstrom, el orden de magnitud correcto para un átomo.

Quizá la confirmación más impresionante de la teoría de Bohr para los átomos con un electrón fue su demostración de que las «líneas de Pickering» que se encontraban en espectros estelares y generalmente se atribuían al hidrógeno, en realidad se debían a átomos de helio con una sola carga. Estas líneas satisfacían la expresión de tipo Balmer $\nu = R\,[1/2^2 - 1/(m + 1/2)^2]$, la cual, si fuera debida al hidrógeno, contradiría la teoría de Bohr, de acuerdo a la cual el estado semicuántico era inadmisible. Bohr convirtió esta amenaza en un triunfo simplemente rescribiendo la expresión como $\nu = 4R[1/4^2 - 1/(2m+1)^2]$ y atribuyéndosela al ión He^+. Su predicción de que las líneas de Pickering deberían aparecer en tubos de descarga con helio puro fue confirmada rápidamente por los espectroscopistas. Sin embargo, el acuerdo entre las longitudes de onda medidas y las que Bohr predecía no era perfecto y según Alfred Fowler, un espectroscopista británico, la pequeña discrepancia era lo bastante grande para cuestionar la validez de la teoría. La respuesta de Bohr, publicada en *Nature* en el otoño de 1913, fue otro ejemplo brillante de lo que el filósofo Imre Lakatos ha denominado ajuste monstruoso: convertir un contraejemplo en un ejemplo. Bohr señaló que la cantidad m en la expresión para R en realidad debería ser la masa reducida, $mM/(m + M)$, donde M es la masa nuclear, y con esta corrección la discrepancia desaparecía.

Bohr derivó la fórmula de Balmer de distintas maneras, incluyendo una primera aplicación de lo que más tarde se conocería como el principio de correspondencia. Bohr observó que, para números cuánticos grandes, casi no existía diferencia entre la frecuencia de rotación antes y después de la emisión de un cuanto; «y de acuerdo a la electrodinámica ordinaria, deberíamos por tanto esperar que la razón entre la frecuencia de la radiación y la frecuencia de revolución también sea casi igual a 1» (Bohr 1963, p. 13). En una ponencia ante la Physical Society en Copenhague en diciembre de 1913, Bohr enfatizó que aunque en general no existía conexión entre las frecuencias clásicas de revolución y las frecuencias que se encontraban utilizando la teoría cuántica, «en un caso, sin embargo, podemos esperar una conexión con los conceptos ordinarios, en concreto, que será posible calcular la emisión de oscilaciones electromagnéticas lentas basándonos en la electrodinámica clásica» (Jammer 1966, p. 110). Éste fue el germen del principio de correspondencia, que tendría un papel crucial en el desarrollo posterior de la teoría atómica y su transformación en mecánica cuántica (véase capítulo 11).

La teoría de Bohr no era simplemente la teoría de los átomos con un electrón, sino que estaba planeada con mucha más ambición. En la segunda y tercera parte de la trilogía, Bohr aplicó su teoría a átomos químicos mayores que el hidrógeno, y también a

moléculas: sugirió disposiciones de electrones para los elementos más ligeros y creyó que sus modelos proporcionaban al sistema periódico su primera explicación fiable. Además, extendió su trabajo a moléculas simples, concibiendo el enlace covalente en la molécula de hidrógeno como dos electrones dando vueltas en la misma órbita entre los dos núcleos de hidrógeno. Esta parte de su trabajo tuvo mucho menos éxito y su impacto fue relativamente pequeño. Sin embargo es digno de mención, ya que era la primera vez que se proponían modelos atómicos claros para átomos reales. El enlace covalente resultó quedar fuera del alcance de la teoría cuántica de Bohr para los átomos, pero en 1913 él no tenía razones para sospecharlo. Por el contrario, existían indicaciones de que la química pronto quedaría reducida a una rama de la nueva física de Bohr. Por ejemplo, Bohr calculó el calor de formación del hidrógeno molecular como 60 kcal por mol, en acuerdo cualitativo pero desde luego no cuantitativo con las 130 kcal por mol determinadas experimentalmente por Irving Langmuir. Cuando Langmuir volvió a estimar el valor experimental obteniendo 76 kcal por mol poco después, y Bohr recalculó el valor teórico obteniendo 63 kcal por mol, parecía que la molécula de hidrógeno estaba prácticamente explicada. Pero estaba lejos de ser cierto.

La fuerza de la teoría de Bohr no era su base teórica, que para muchos parecía poco convincente e incluso extravagante, sino su confirmación experimental en una amplia gama de fenómenos. Por ejemplo, en 1913-1914 el joven físico británico Henri Moseley estudió los rayos X característicos emitidos por distintos elementos y mostró que la raíz cuadrada de las frecuencias era proporcional al número atómico. El diagrama de Moseley se convirtió rápidamente en una importante herramienta para determinar el lugar de un elemento en la tabla periódica, y también se convirtió en una importante confirmación de la teoría de Bohr. El mecanismo de Moseley para la emisión de rayos X se apoyaba en la teoría de Bohr y, además, en una serie de trabajos desarrollados a partir de 1914 en Múnich, Walther Kossel explicó los espectros de rayos X en completo acuerdo con la teoría. Otra importante confirmación fueron los experimentos con bombardeo de electrones de vapor de mercurio que James Franck y Gustav Hertz realizaron en Gotinga entre 1913 y 1916. En 1925, los dos físicos fueron galardonados con el premio Nobel por haber verificado las hipótesis de Bohr y haberlas por lo tanto transformado en «hechos experimentalmente probados», como Carl Oseen expresó en su discurso de presentación en Estocolmo. Irónicamente, Franck y Hertz no relacionaron al principio sus experimentos con la teoría de Bohr y, cuando lo hicieron por primera vez, argumentaron que sus medidas no podían explicarse por la teoría. Franck y Hertz midieron lo que ellos creían que era el potencial de ionización, obteniendo 4,9 voltios, pero en 1915 Bohr argumentó que habían malinterpretado sus resultados y que no habían medido un potencial de ionización en absoluto, sino la diferencia de energía entre estados estacionarios en los átomos de mercurio. Fue sólo tras la intervención de Bohr cuando Franck y Hertz se dieron cuenta de que inadvertidamente habían proporcionado un fuerte apoyo a la teoría atómica de Bohr.

La línea roja del espectro de hidrógeno tiene una estructura de doblete, como mostraron por primera vez Michelson y Edward Morley nada menos que en 1887. Aunque

en 1913 la separación de estructura fina se había medido varias veces, Bohr parece que no había tenido conocimiento de este fenómeno, para el cual no había sitio en su teoría. Pero de nuevo una aparente anomalía se convirtió en una confirmación, aunque esta vez requirió una extensión considerable de la teoría. La extensión fue realizada por Arnold Sommerfeld en Múnich quien, en 1915-1916 introdujo la teoría especial de la relatividad en la mecánica del átomo de Bohr. De esta manera, llegó a un átomo con dos cuantos en el que las órbitas electrónicas se describían con números cuánticos principales y azimutales, y una expresión para la energía que dependía de los dos números cuánticos. De acuerdo con la teoría más sofisticada de Sommerfeld, existían muchos más estados estacionarios que en la teoría de Bohr de 1913, y esto hacía posible una explicación de la estructura fina. Sommerfeld derivó un valor para la separación de estructura fina, que fue completamente confirmado mediante experimentos realizados por Friedrich Paschen de la Universidad de Tubinga en 1916. El notable acuerdo entre teoría y experimentación se consideró un gran éxito de la teoría de Bohr-Sommerfeld y también de la teoría de la relatividad. De hecho, la relación entre teoría y experimentación era bastante oscura porque la teoría permitía el cálculo de frecuencias pero no de intensidades; sin embargo, aunque el éxito fuera cuestionado por unos pocos físicos en Alemania, para la mayoría el trabajo de Sommerfeld y Paschen resultaba una asombrosa confirmación de la teoría cuántica de los átomos de Bohr.

CAPÍTULO 5

La lenta ascensión de la teoría cuántica

La ley de la radiación de los cuerpos negros

La teoría cuántica debe su origen al estudio de la radiación térmica, en particular de la radiación del «cuerpo negro» que Robert Kirchhoff había definido por primera vez en 1859-1860. De acuerdo con Kirchhoff, un cuerpo negro perfecto es aquel que absorbe toda la radiación que incide sobre él; la energía emitida será independiente de la naturaleza del cuerpo y dependiente sólo de su temperatura. El físico austriaco Josef Stefan sugirió en 1879 que la energía de la radiación calorífica ideal de Kirchhoff variaba según la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Su sugerencia obtuvo una prueba teórica cinco años después cuando su compatriota Ludwig Boltzmann combinó la segunda ley de la termodinámica con la electrodinámica de Maxwell para mostrar que $u = \sigma T^4$, siendo u la densidad total de energía y σ una constante. La primera de varias leyes de la radiación del cuerpo negro, la ley de Stefan-Boltzmann, ayudó a dirigir la atención hacia la nueva área de la física teórica y experimental. La distribución espectral de la radiación, una cuestión acerca de la cual la ley de Stefan-Boltzmann no tenía nada que decir, pronto emergió como un problema importante y ampliamente debatido. Un importante paso hacia la solución del problema se dio por parte de Wilhelm Wien, quien mostró en 1894 que si la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro era conocida para una temperatura, podría ser deducida para cualquier otra. La función de distribución $u(\lambda,T)$ no dependería de T y de la longitud de onda λ por separado, sino del producto λT mediante cierta función $\phi(\lambda T)$, en concreto mediante $u(\lambda, T) = \lambda^{-5}\, \phi(\lambda T)$. La ley de desplazamiento de Wien –así denominada porque implica que el pico de la función $u(\lambda,T)$ será desplazado hacia longitudes de onda más pequeñas cuando T aumente– resultó estar en excelente acuerdo con los experimentos. Se reconoció que la función $\phi(\lambda T)$ tenía un significado universal, pero ni la forma de la función ni su explicación eran conocidas. En 1896 Wien encontró una posible solución, concretamente, que $\phi(\lambda T)$ tuviera la forma $\exp(-\alpha/(\lambda T)$, siendo α una constante

universal. La ley de radiación de Wien parecía ser correcta y se aceptó en general, sobre todo tras recibir confirmación mediante una serie de delicados experimentos realizados en Berlín entre 1897 y 1899. Aunque la ley de Wien parecía empíricamente convincente, se apoyaba sin embargo sobre argumentos teóricos de naturaleza insatisfactoria, y por este motivo se buscaba una derivación más rigurosa. Aquí es donde Max Ludwig Planck, el sucesor de Kirchhoff como profesor de física en la universidad de Berlín entró en escena.

Planck era un especialista en termodinámica y estaba profundamente interesado en la segunda ley y sus aplicaciones en física y química. Su principal ocupación a principios de la década de 1890 no era la física teórica, sino más bien la termodinámica química, a la cual intentó dotar de unos cimientos más rigurosos basados en la segunda ley. En este trabajo, los conceptos de entropía e irreversibilidad eran centrales. El núcleo del programa de investigación de Planck era un intento de explicar los procesos irreversibles sobre una base estrictamente termodinámica, es decir, sin introducir ninguna suposición estadística o atomística a la manera de Boltzmann. Al contrario de su colega austriaco de mayor edad, Planck creía firmemente en la validez absoluta de la segunda ley y negaba que pudiera existir relación alguna entre entropía y probabilidad. En 1895 el razonamiento de Planck le llevó a examinar la relación entre termodinámica y electrodinámica. Atacó la cuestión de la irreversibilidad desde un punto de vista electrodinámico y argumentó que la irreversibilidad de los procesos de radiación era un resultado de la falta de simetría temporal en las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, el enfoque termodinámico resultó no tener éxito. Como Boltzmann mostró dos años después, la electrodinámica no es más asimétrica temporalmente –no proporciona una «flecha temporal»– que la mecánica, así que Planck tuvo que buscar otra manera de determinar el espectro de la radiación del cuerpo negro. El resultado de los renovados intentos de Planck fue una serie de seis artículos sobre procesos de radiación irreversibles publicados en *Annalen der Physik* entre 1897 y 1900. En 1899 encontró una expresión para la entropía de un oscilador mediante la cual pudo derivar la ley de radiación de Wien. Esto era lo que Planck esperaba y, si no hubiera sido por los experimentales, lo habría dejado aquí. En el mismo año en que Planck derivó la ley de Wien, los experimentos demostraron que la ley no era completamente correcta, al contrario de lo que Planck y la mayoría de los otros físicos habían supuesto.

En la historia de la radiación del cuerpo negro, y por lo tanto en el nacimiento de la teoría cuántica, los experimentos no eran menos importantes que la teoría. La mayoría de los experimentos decisivos se realizaron en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Instituto Imperial de Física y Tecnología) de Berlín, donde el espectro preciso de la radiación del cuerpo negro era un asunto de interés mucho más que académico. Se pensaba que conduciría a un conocimiento que sería útil a las industrias alemanas de electricidad y calefacción, que estaban entre los mayores clientes del Reichsanstalt. Experimentos realizados por Otto Lummer y Ernst Pringsheim en 1899 indicaban que la ley de Wien era incorrecta para altas longitudes de onda. Experimentos adicionales de Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum, publicados en el otoño de

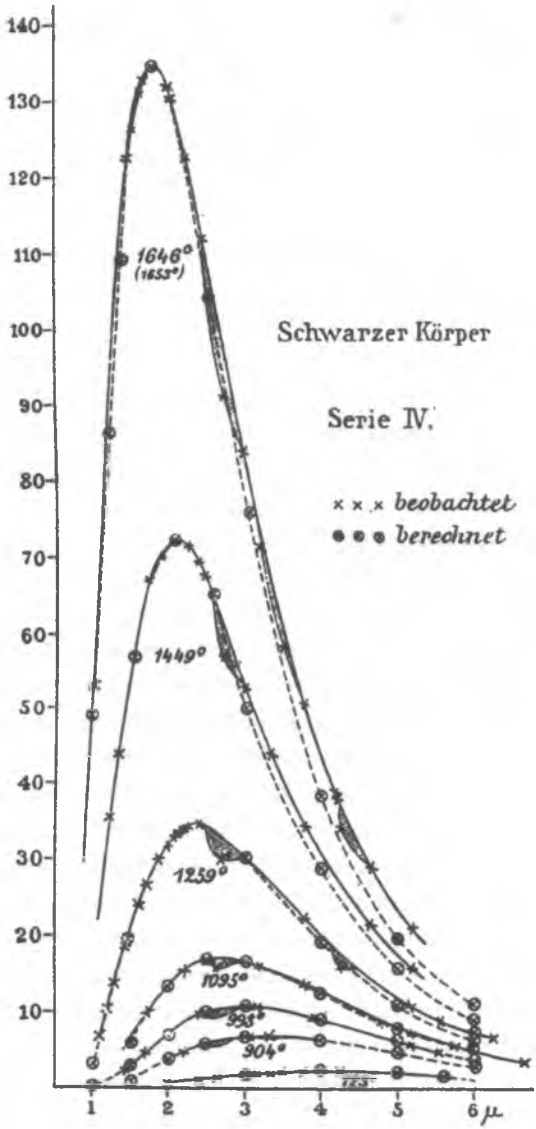


Gráfico 5.1. Espectros de cuerpo negro a diferentes temperaturas medidos por Lummer y Pringstein en noviembre de 1899. Para los valores altos de λT, la curva medida (línea continua) está sobre la curva calculada (curva discontinua), indicando la inadecuación de la ley de radiación de Wien. *Fuente:* Kangro 1976, p. 176.

1900, proporcionaron una prueba clara de que la «ley de Wien-Planck» era sólo aproximadamente cierta (véase figura 5.1). De acuerdo a esta ley, la densidad de energía de la radiación $u(\nu,T)$ tendería hacia cero para valores muy pequeños de $\nu/T = c/\lambda T$, mientras que los experimentos de Rubens y Kurlbaum mostraban que $u(\nu,T)$ tendía hacia T. Como consecuencia de estas nuevas medidas, se propusieron varias nuevas le-

ves empíricas, pero éstas no tenían importancia para los teóricos. El interés principal de Planck no era encontrar una ley empíricamente correcta, sino derivarla de primeros principios. Se veía ahora forzado a reconsiderar su trabajo. Algo estaba mal en su derivación de la ley de Wien, pero ¿el qué? ¿Cómo podía construir a partir de principios fundamentales de la física una ley de distribución que satisficiera la expresión de Wien para valores grandes de ν/T pero tendiese a T para valores pequeños? Las reconsideraciones de Planck le llevaron rápidamente a suponer una nueva expresión para la entropía de un oscilador, si bien una que no tenía justificación teórica clara. Sobre esta expresión se ha comentado, con justicia, «nunca en la historia de la física ha habido una interpolación matemática no evidente con consecuencias físicas y filosóficas de tan gran alcance» (Jammer 1966, p. 18).

Con su nueva expresión para la entropía, Planck pudo derivar lo que él consideraba simplemente una versión mejorada de la ley de Wien. La nueva ley de distribución –la ley de radiación de Planck, pero todavía sin noción de cuantos de energía– se anunció en un encuentro de la Academia de Ciencias de Berlín el 19 de octubre de 1900. De acuerdo a esta primera versión correcta de la ley de la radiación del cuerpo negro, la densidad de energía espectral varía como ν^3 dividido por la cantidad $\exp(\beta\nu/T) - 1$. La ley parecía estar en completo acuerdo con los datos experimentales y era, en este sentido, la respuesta que se había buscado durante tanto tiempo. Sin embargo, ya que la nueva ley se apoyaba en una expresión para la entropía que era poco más que una suposición inspirada, no era satisfactoria teóricamente y por lo tanto Planck se vio obligado, de nuevo, a considerar por qué la fórmula disfrutaba de tanto éxito. No podía descansar satisfecho hasta que comprendiese la nueva ley.

En su intento de obtener una comprensión satisfactoria, Planck se dio cuenta de que tenía que introducir un nuevo enfoque, en concreto, volver a la idea de Boltzmann de entropía como expresión de caos molecular. Esto no significa que Planck se rindiera a las nociones de entropía e irreversibilidad probabilísticas de Boltzmann. En vez de aceptar estas ideas, Planck reinterpretó la teoría de Boltzmann a su manera no probabilista. Basó su nueva línea de ataque en la famosa «ecuación de Boltzmann», $S = k \log W$, donde k es la constante de Boltzmann y W es una expresión combinatoria para el desorden molecular. En realidad, la ecuación no era de Boltzmann, sino que apareció en esta forma sólo con el trabajo de Planck; y también fue Planck quien introdujo por primera vez la «constante de Boltzmann» como una importante constante de la naturaleza. Para encontrar W, Planck introdujo lo que denominó «elementos de energía», es decir, la suposición de que la energía total de los osciladores del cuerpo negro (E) se dividía en porciones finitas de energía ϵ En palabras de Planck: «Considero E [...] compuesto de un número completamente determinado de partes iguales finitas, y para este propósito utilizo la constante de la naturaleza $h = 6{,}55 \times 10^{-27}$ (erg seg). Esta constante, una vez se multiplica por la frecuencia común de los resonadores, proporciona el elemento de energía ϵ en ergios, y mediante división de E por ϵ obtenemos el número de elementos de energía P que ha de ser distribuido entre los N resonadores» (Darrigol 1992, p. 68). La nueva derivación se comunicó en otro encuentro de la Academia

de Berlín, el 14 de diciembre de 1900, una fecha señalada muchas veces como la del nacimiento de la teoría cuántica porque fue aquí cuando, según se ve en retrospectiva, se sugirió por primera vez la hipótesis cuántica. Sin embargo, Planck no entendía realmente la introducción de elementos de energía como una cuantización de la energía, es decir, que la energía de los osciladores pudiera tener sólo valores discretos. Planck no enfatizó la discontinuidad cuántica en absoluto y consideraba $\epsilon = h\nu$ como una hipótesis matemática sin realidad física detrás. Era, creía, un aspecto temporal de la teoría que debería ser borrado de la formulación final.

De esta manera describía Planck la ruta que le había conducido a la ley de radiación en una carta de 1931 al físico americano Robert Wood:

> En resumen, todo lo que sucedió puede describirse como simplemente un acto de desesperación [...] Para entonces llevaba seis años (desde 1894) luchando sin éxito con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que este problema era de importancia fundamental para la física. También conocía la fórmula que expresa la distribución de energía en espectros normales. Se debía encontrar por lo tanto una interpretación teórica a cualquier coste [...] [El nuevo] enfoque se me presentó mediante el mantenimiento de las leyes de la termodinámica [...] que deben, eso me parece a mí, mantenerse en todas las circunstancias. Para lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cada una de mis convicciones previas sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo el equilibrio termodinámico se establece mediante un equilibrio estadístico, y tal enfoque se aplica al equilibrio entre materia y radiación, uno encuentra que la pérdida continua de energía en radiación se puede impedir asumiendo que la energía está forzada, desde el principio, a permanecer junta en determinados cuantos. Ésta era una suposición puramente formal y realmente no reflexioné mucho sobre ella excepto que, a cualquier coste, debía proporcionar un resultado positivo. (Hermann 1971, p. 23)

Para Planck y sus contemporáneos, la discontinuidad cuántica al principio era considerada una característica que no merecía seria atención. Lo que importaba era más bien la impresionante precisión de la nueva ley de radiación, confirmada por muchos experimentos posteriores, y el hecho de que incluía la ley de Stefan-Boltmann, la ley de desplazamiento de Wien y, en el límite de valores $\nu u/T$ grandes, la ley de radiación de Wien. Planck enfatizó las constantes de la naturaleza involucradas en su ley y la utilizó para derivar valores para k, N (el número de Avogadro) y e (la carga elemental). A partir de las medidas del cuerpo negro pudo encontrar k, y como $k = R/N$, donde R es la constante de los gases, N se pudo derivar; además, de $e = F/N$, donde F es la constante de Faraday, conocida a partir de la electrólisis, pudo hallar e. Las determinaciones numéricas de Planck eran muy superiores a las estimaciones bastante crudas que se obtenían mediante otros métodos por aquel entonces.

En diciembre de 1900 Planck no reconoció que la nueva ley de radiación hacía necesaria una ruptura con la física clásica. Tampoco lo hicieron, en todo caso, otros físicos. Vale la pena fijarse en que ninguna «catástrofe ultravioleta» estaba involucrada en

la formación de la ley de radiación de Planck. La base de esta «catástrofe» es que el teorema de equipartición de la mecánica clásica, cuando se aplica a los osciladores de un cuerpo negro, lleva a una densidad de energía de la forma $\nu^2 T$ y así, cuando se integra sobre todas las frecuencias, a una energía total infinita. En este sentido, existe un conflicto entre la física clásica y el espectro del cuerpo negro, pero el conflicto no tuvo ningún papel en los sucesos que realmente condujeron a la hipótesis de Planck. La ley de radiación mencionada fue obtenida por Lord Rayleigh en el verano de 1900, aunque él añadió un factor *ad hoc* de $\exp(-a\nu/T)$ con el objeto de hacer que la fórmula estuviera más de acuerdo con los datos. La fórmula $u \sim \nu^2 T$ se conoce hoy día como la ley de Rayleigh-Jeans porque fue vuelta a derivar por Rayleigh en 1905 y provista de una corrección numérica por James Jeans el mismo año. Aunque Rubens y Kurlbaum incluyeron la fórmula de Rayleigh en su artículo de 1900, Planck la ignoró, así como el teorema de equipartición. La ley de Rayleigh-Jeans, sin el factor exponencial, es obviamente incorrecta para altas frecuencias, pero la discrepancia no se veía como un gran problema para la física clásica. Por aquel entonces muchos físicos, incluyendo a Rayleigh y Jeans, dudaban que el teorema de equipartición fuera generalmente válido.

Primeros debates sobre la hipótesis cuántica

Si ocurrió una revolución en la física en 1900, nadie pareció darse cuenta, y Planck el que menos. Durante los primeros cinco años del siglo, había un silencio casi completo sobre la hipótesis cuántica, que de manera algo oscura estaba involucrada en la derivación de Planck de la ley de radiación del cuerpo negro. La misma ley, por otro lado, fue rápidamente adoptada por su convincente acuerdo con los experimentos. Tan pronto como en 1902, la fórmula de la ley de radiación de Planck aparece en el segundo volumen del fidedigno *Manual de espectroscopía* de Heinrich Kayser, pero sin mención alguna sobre la naturaleza de la suposición cuántica. Aunque a veces surgía alguna crítica, en 1908 el resultado de Planck era generalmente aceptado como la correcta respuesta a la cuestión del espectro del cuerpo negro. Sólo un puñado de teóricos consideró que valía la pena entrar en los detalles de los cálculos de Planck y preguntarse *por qué* la fórmula era correcta.

Uno de ellos era Hendrik A. Lorentz, que empezó a concentrarse en la teoría del cuerpo negro en 1903, cuando derivó de manera independiente la ley de Rayleigh-Jeans, basándose en la teoría electrónica. El resultado le desconcertó. Cinco años más tarde, en un congreso matemático en Roma, presentó una panorámica del problema del cuerpo negro o, en su terminología, la división de la energía entre materia ponderable y éter. Según lo veía Lorentz, la elección estaba entre, por un lado, la fórmula de Rayleigh-Jeans, teóricamente satisfactoria pero empíricamente inadecuada y, por otro, la fórmula de Planck, empíricamente confirmada pero teóricamente insatisfactoria. Notablemente, prefería la primera opción y sugirió vagamente que se necesitaban nuevos experimentos para decidir entre los dos candidatos. Los experimentales alemanes sabían más de esto. Convencidos de que el asunto estaba firmemente resuelto, no que-

rían saber nada de la ley de Rayleigh-Jeans y protestaron contra la sugerencia de Planck. En consecuencia, Lorentz se vio forzado a aceptar la fórmula de Planck y a intentar entender su verdadero significado. Reconociendo que teoría de Planck presentaba algunas características no clásicas, Lorentz se convirtió en uno de los líderes de la nueva teoría cuántica.

Como resultado del seminario de Lorentz en Roma, las consecuencias «catastróficas» de la ley clásica de Rayleigh-Jeans se hicieron más conocidas en la comunidad física; fue sólo a partir de entonces cuando la «catástrofe ultravioleta» comenzó a desempeñar un papel importante en las discusiones. (La expresión fue introducida por Ehrenfest en 1911 y se convirtió en un tema popular en los libros de texto de física.) La teoría del electrón era la teoría microscópica dominante y de mayor éxito de la época, así que era tentador creer que esta teoría podría de algún modo resolver los enigmas de la radiación del cuerpo negro. Esto fue lo que Lorentz intentó en 1903, sólo para acabar con la ley de Rayleigh-Jeans. Por un tiempo, Planck siguió la idea de que los cuantos de electricidad podían conducir cuantos de energía. Por ejemplo, en 1905 escribió a Paul Ehrenfest, «no me parece imposible que esta suposición (la existencia de un cuanto elemental de electricidad) ofrezca un puente a la existencia de un cuanto de energía elemental h, en particular porque h tiene la mismas dimensiones que e^2/c»(Kuhn 1978, p. 132). Aquí tenemos, aunque sea sólo implícitamente, el primer presentimiento de la constante de estructura fina $2\pi e^2/hc$. Sin embargo, nada se obtuvo de esta idea ni de otros intentos de deducir el cuanto de acción de teorías existentes. Si bien vale la pena fijarse en el profundo interés de Planck en las constantes universales de la naturaleza y su posible interrelación. En un artículo de 1899 –el primero en el que la constante de Planck aparece implícitamente– notó que todos los sistemas de unidades ordinarios estaban basados en «las necesidades especiales de nuestra cultura terrestre» y sugirió como alternativa un sistema basado en lo correspondiente a las constantes h, c y G. Estas unidades, escribió, «necesariamente retendrían su significación de manera independiente a cuerpos y sustancias especiales, para todo tiempo y toda cultura, incluso las extraterrestres y extrahumanas». Las unidades que Planck propuso no tenían valor práctico y fueron ignoradas largo tiempo. Sin embargo, con la llegada de las teorías de gravedad cuántica de los años setenta, fueron ampliamente discutidas y hoy, a finales del siglo XX, la masa de Planck (10^{-5} gramos) y el tiempo de Planck (10^{-43} segundos) son importantes magnitudes en la teoría cosmológica (véase también el capítulo 27).

Durante casi una década, Planck creyó que su ley de radiación podría reconciliarse con la mecánica clásica y la electrodinámica y que las discontinuidades eran características de los osciladores atómicos, no del intercambio de energía como tal. Se dio cuenta de que algún tipo de cuantización estaba involucrado, pero no en el sentido que los valores de la energía de los osciladores estuvieran limitados a un conjunto discreto $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, ... En sus primeros artículos, había escrito la ecuación de la energía $E = nh\nu$ ($n = 0, 1, 2, ...$) pero con E significando la energía total de los osciladores, sin requerir que la energía de los osciladores individuales estuviera restringida del mismo modo. Fue sólo sobre 1908 cuando, en parte como resultado de su correspondencia con Lorentz, se

convirtió al punto de vista de que el cuanto de acción era un fenómeno irreducible más allá del entendimiento de la física clásica. Hasta entonces pensaba en $h\nu$ como la parte más pequeña del continuo de energía más que como algo que pudiera existir por sí solo, un cuanto de energía análogo al cuanto eléctrico, el electrón. Como escribió a Lorentz en 1909, ahora adoptaba la hipótesis de que «el intercambio de energía entre electrones y éter libre ocurre sólo en números enteros de cuantos $h\nu$» (Kuhn 1978, p. 199).

A finales de la primera década del siglo XX, la teoría cuántica todavía se entendía de manera muy pobre y era estudiada seriamente tan sólo por unos pocos físicos teóricos. Éstos incluían a Lorentz, Ehrenfest, Jeans, Einstein, Larmor y, por supuesto, Planck. Hasta 1906, Einstein era el único que se daba cuenta de la naturaleza radical y no clásica de la teoría de Planck, pero cuatro años después, la mayoría de los especialistas reconocían que la cuantización de la energía era real y hacía necesario algún tipo de ruptura con la física clásica. Durante la primera década, la teoría cuántica era en su mayor parte idéntica a la teoría de la radiación del cuerpo negro, y el pequeño campo no tuvo un gran impacto en la comunidad física. Esto se ilustra en el gráfico 5.2, que proporciona el número de autores que publicaba sobre temas cuánticos entre 1905 y 1914. Antes de entonces, es decir, de 1900 a 1904, el número de autores sobre teoría cuántica era o bien cero o uno (el único que contribuía era Planck, en 1900 y 1901). La figura ilustra no sólo la lenta ascensión de la teoría cuántica, sino también el dominio de la física del cuerpo negro hasta 1910, cuando publicaciones sobre calores específicos y, a partir de 1913 aproximadamente, física atómica y molecular, empezaron a cambiar tanto la composición como el ritmo de la teoría cuántica.

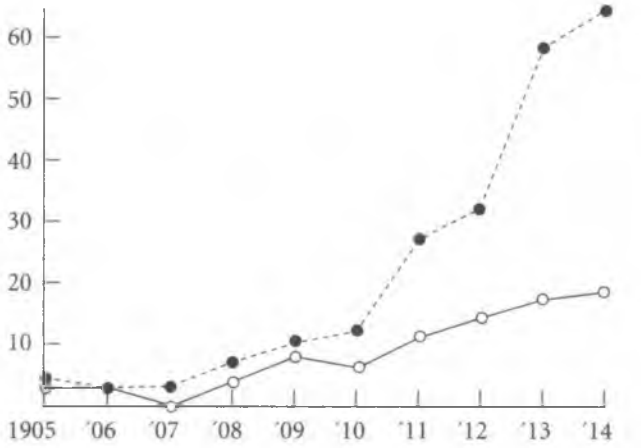


Gráfico 5.2. La ligera ascensión de la teoría cuántica. Los círculos en negro indican el número de autores que publicaron sobre temas de cuántica. Los círculos en blanco se refieren al número de autores que lidiaban con la teoría de los cuerpos negros, un subgrupo de la temprana física cuántica. *Fuente:* redibujado de T. S. Kuhn, *Black-Body theory and Quantum Discontinuity.* Derechos reservados © 1978 por Oxford University Press. Usado con permiso de Oxford University Press.

Einstein y el fotón

Se ha afirmado que, incluso si Planck no hubiera encontrado su fórmula para la radiación del cuerpo negro que inició la primera teoría cuántica, la teoría habría llegado de todos modos en los primeros años del siglo XX. El candidato como hipotético descubridor de la teoría cuántica es Einstein, quien es más conocido, por supuesto, por su invención de la teoría de la relatividad. Si bien el joven Einstein también hizo contribuciones a la primera teoría cuántica de tal importancia –y en 1905, el mismo año que introdujo la relatividad– que podrían justificar la afirmación. De hecho, Einstein parece haber considerado su teoría de los cuantos incluso más importante que su trabajo inmediatamente posterior sobre relatividad especial. En una carta de mayo de 1905 a su amigo Conrad Habicht, se refiere a su próximo artículo sobre «la radiación y las propiedades energéticas de la luz» como «muy revolucionario». Al artículo en preparación sobre relatividad especial se refería más modestamente como «una electrodinámica de cuerpos móviles que utiliza una modificación de las ideas de espacio y tiempo». Mientras que Planck, como se ha dicho, se convirtió en un revolucionario en contra de su voluntad, Einstein reconoció las implicaciones revolucionarias de la hipótesis cuántica mucho más claramente y actuó voluntariamente como un profeta de la revolución cuántica. Hay mucha verdad en la afirmación de que la teoría cuántica empezó en serio sólo en 1905, con las obras de Einstein.

¿Cuál era, entonces, la esencia del autoproclamado revolucionario trabajo de Einstein sobre la radiación publicado en *Annalen der Physik* el 9 de junio de 1905? Primero, el enfoque de Einstein difería drásticamente del de Planck y apenas se apoyaba en la ley de radiación de Planck y su cuanto de acción asociado. Einstein sí mencionó la ley, pero sin utilizarla; en vez de eso, se centró en la antigua ley de Wien en su régimen experimentalmente confirmado, es decir, para altas frecuencias y bajas temperaturas. Einstein dejó claro que ésta era la parte interesante y problemática del espectro, la que requería nuevas hipótesis físicas. La teoría clásica conduciría a la ley de Rayleigh-Jeans, enfatizó Einstein, y fácilmente derivó esta ley, incluyendo el factor correcto delante de $\nu^2 T$. Teniendo en cuenta las prioridades, la ley podría llamarse de Rayleigh-Einstein o de Einstein (o, ya puestos, aunque sería más aparatoso, la ley de Rayleigh-Lorentz-Einstein-Jeans). Sin embargo, fue la ley de Wien la que consideró Einstein en su trabajo de 1905. Utilizando argumentos termodinámicos sencillos pero ingeniosos, y utilizando al máximo la probabilística de Boltzmann (la expresión de la entropía $S = k \log SW$), calculó la probabilidad de que la energía total de la radiación en un contenedor esté contenida en una parte pequeña del volumen total. A partir de su resultado razonó, mediante una analogía con la teoría clásica de los gases, que «la radiación monocromática de baja densidad se comporta –siempre que la ley de radiación de Wien sea válida– [...] como si consistiera en cuantos de energía mutuamente independientes de magnitud $R\beta\nu/N$». Es decir, según Einstein, la propia radiación tenía una estructura discreta o atomística, una hipótesis que iba mucho más allá de la sugerida por Planck. Además, según Einstein, la energía de los osciladores responsables de la emisión y absorción de la luz cambiaría de manera discreta, en múltiplos de $h\nu$. Obsérvese que el

símbolo β denota h/k, igual que Planck lo usaba antes de que introdujera la hipótesis de cuantización y explícitamente, el cuanto de acción, en diciembre de 1900. No fue un accidente que Einstein no utilizara la notación de Planck ni su teoría más madura de la radiación de cuerpo negro. Por aquel entonces, Einstein creía que no se podía hacer que la teoría de Planck estuviera de acuerdo con la idea de cuantos de luz, un error que corrigió en un artículo de 1906. Con $k = R/N$ y $\beta = h/k$, obtenemos la forma habitual de los cuantos de radiación, $E = h\nu$.

Einstein era muy consciente de la naturaleza radical de su «enfoque heurístico» de la radiación libre como consistente en cuantos discretos, o, como se les denominó más tarde, fotones. (El nombre fue sugerido por el químico estadounidense Hilbert Lewis en 1926.) Después de todo, existía una impresionante evidencia a favor de la teoría ondulatoria de la luz y, por esta razón, Einstein enfatizó que su concepto de cuantos de luz era provisional. Sin embargo, estaba convencido de la realidad de los cuantos de luz e intentó con gran empeño mostrar que su hipótesis era empíricamente fructífera. En concreto, considerando el efecto fotoeléctrico como un proceso de intercambio de energía en el cual se liberan electrones de la superficie de un metal iluminado por luz, consiguió explicar los experimentos realizados por Philipp Lenard en 1902. Además, se seguía directamente de la teoría de Einstein, que la energía máxima (E) de los electrones generados por la luz debe relacionarse linealmente con la frecuencia de la luz incidente. La ecuación de Einstein era $E = h\nu - P$, siendo P una función de trabajo que depende del metal del ánodo. Por aquel entonces, ni Lenard ni otros habían medido E como función de ν, y la ecuación fotoeléctrica de Einstein era por lo tanto una predicción realmente novedosa. La teoría de Einstein no era una respuesta a una anomalía experimental que la teoría clásica no pudiera explicar, ya que en 1905 el efecto fotoeléctrico no se consideraba problemático. Fue sólo unos años después cuando los experimentales asumieron la relación entre E y ν. Y cuando lo hicieron, no fue con el propósito de comprobar la teoría de Einstein.

En lo concerniente a los datos experimentales, durante varios años mostraron una confusa disparidad, yendo de relaciones cuadráticas a logarítmicas y a lineales (es decir, de $E \sim \nu^2$ a $E \sim \log\nu$ a $E \sim \nu$). Sólo alrededor de 1914 se acumularon evidencias a favor de la ley lineal, y con la famosa serie de experimentos de 1916 de Robert Millikan por fin se obtuvo un consenso. Quedó entonces establecido más allá de cualquier duda que la energía máxima de los electrones emitidos en efecto varía linealmente con la frecuencia de la luz, justo como Einstein predijo en 1905. Podría quizá creerse que esto habría sido recibido como un gran éxito de la teoría de Einstein y habría hecho que la mayoría de los físicos aceptaran la hipótesis de los cuantos de luz. En este caso, se estaría equivocado. Ninguno de los experimentales concluyó a favor de la «hipótesis arriesgada, por no decir temeraria, de Einstein», como Millikan la calificó en 1916. Lo que Millikan había confirmado era la ecuación de Einstein, no su teoría, y no existía una relación unívoca entre teoría y ecuación. Era posible derivar la ecuación confirmada experimentalmente sin la hipótesis del cuanto de luz, y cuando estas alternativas más o menos clásicas, (y, de hecho, más o menos *ad hoc*) resultaron ser insostenibles,

siempre existía la posibilidad de declarar el efecto fotoeléctrico inexplicado por el momento: esto es lo que sucedió. La teoría de los cuantos de luz fue o bien ignorada o bien rechazada tanto por los experimentales como por los teóricos. Era una hipótesis simplemente demasiado radical. En 1913, cuando Einstein fue propuesto como miembro de la prestigiosa Academia de las Ciencias Prusiana (o de Berlín), los que le nominaron, entre ellos Planck y Walther Nernst, ensalzaron a Einstein, pero también mencionaron que «puede haber errado a veces el tiro en sus especulaciones, como, por ejemplo, en su hipótesis sobre los cuantos de luz» (Jammer 1966, p. 44).

Impasible ante la fría respuesta al cuanto de luz, Einstein continuó trabajando en la teoría cuántica, la cual fue su principal área de ocupación profesional durante los años 1906-1911, y de mayor importancia para él que la teoría de la relatividad. En un artículo de 1909, Einstein derivó las fluctuaciones energéticas de la radiación del cuerpo negro. Su fórmula consistía en dos términos, uno que él atribuía a la naturaleza cuántico-corpuscular de la radiación y otro que él interpretaba como un término ondulatorio clásico. Así pues, desde el punto de vista de Einstein, la radiación electromagnética incluía ambas características, que tradicionalmente se consideraban contradictorias. En 1909 la fusión de Einstein de la teoría de partículas y ondas era altamente provisional, pero una serie de trabajos posteriores, desarrolló la idea y, tras 1925, pasaría a ser una parte integral de la mecánica cuántica. Otro aspecto del trabajo de Einstein de 1909 merece mención, en concreto el que considerara fluctuaciones de momento junto con fluctuaciones de energía. Una partícula real tiene momento además de energía, y en 1909 Einstein claramente pensaba en el cuanto de luz como una partícula en el mismo sentido en que los átomos y los electrones son partículas. Sin embargo, aunque el momento del cuanto de luz ($p = h\nu/c$) se sigue directamente de la teoría de la relatividad, Einstein escribió la expresión sólo en 1906.

Calores específicos y el estado de la teoría cuántica en 1913

Al igual que Einstein fue el primero en extender el significado de la teoría cuántica al campo de la radiación, también fue el primero en extenderlo a un problema de lo que más tarde sería conocido como física del estado sólido. Hizo esto en 1907, cuando aplicó la teoría cuántica al cálculo de los calores específicos de los sólidos. Se sabía desde 1819 que existe una relación peculiar entre los pesos atómicos de los elementos sólidos y sus capacidades caloríficas específicas, en concreto que (en lenguaje moderno) la capacidad calorífica molar es básicamente una constante, de unas 6,4 calorías por mol por grado. En 1876 la ley de Dulong-Petit, llamada así por sus descubridores franceses, recibió una explicación teórica sólida gracias a Boltzmann, quien mostró que se derivaba del teorema de equipartición de la física mecánica. Aunque se consideró generalmente un gran éxito del punto de vista mecánico-atómica de la materia, el éxito no era completo. Existen unas pocas excepciones a la ley de Dulong y Petit, como el carbono (diamante), boro y silicio. La anomalía del carbono se conocía desde 1841, cuando los experimentos mostraron que el calor específico molar del diamante era de

1,8 aproximadamente, en vez de los 6,4 que podían esperarse de la regla de Dulong-Petit. Además, experimentos realizados a partir de 1870 mostraron que los calores específicos se incrementan con la temperatura y, en el caso del diamante, de manera bastante considerable. En 1875 el físico alemán Heinrich Weder estableció que el calor específico del diamante se incrementa en un factor de 15 en el rango de –100 °C a +1.000 °C, y experimentos posteriores publicados en 1905 por el químico escocés James Dewar mostraron que los calores específicos casi se anulaban a temperaturas cercanas a 20 K. Los intentos de explicar la variación fallaron, y por tanto el problema de los calores específicos resultaba una anomalía hasta que Einstein lo atacó en 1907, con bastante éxito.

Utilizando la ley de distribución de Planck en su trabajo de 1907, Einstein encontró una expresión para la energía media de un átomo en un cristal vibrando en tres dimensiones con la misma frecuencia. Esta expresión proporcionaba el valor clásico $3kT$ para altas temperaturas, y por tanto llevaba a la ley de Dulong y Petit pero decaía exponencialmente cuando T tendía a cero. En este régimen, el teorema clásico de equipartición –la base de la ley de Dulong y Petit– no podía aplicarse. Comparando su fórmula para la capacidad calorífica con los datos obtenidos por Weber, Einstein consiguió ajustar la frecuencia de vibración de manera que se obtenía un acuerdo con los experimentos prometedor, aunque no perfecto. La teoría de Einstein fue importante porque atrajo interés hacia la teoría cuántica; sin embargo era sólo aproximada y necesitaba claramente modificaciones, sobre todo cuando nuevos experimentos mostraron que la variación a bajas temperaturas estaba en desacuerdo cuantitativo con la teoría. Una versión mucho más sofisticada de la teoría de Einstein fue desarrollada en 1912 por el teórico holandés Peter Debye y su versión produjo una similitud muy cercana a los experimentos.

La teoría de los calores específicos ayudó a acercar la teoría cuántica hacia áreas de la física más tradicionales y la hizo conocida para los muchos físicos que no estaban interesados o no comprendían los detalles más finos de la radiación del cuerpo negro: a este respecto, fue mucho más importante que la teoría de los cuantos de luz. Sin embargo, su impacto no fue instantáneo. De hecho, hasta 1910-1911, la teoría de Einstein de los calores específicos estaba tan ausente de la literatura científica como su teoría de los cuantos de luz. Fue sólo entonces cuando los físicos empezaron a darse cuenta de ella y, bastante repentinamente, la teoría cuántica de los calores específicos fue reconocida como un área de investigación importante. En 1913 había más publicaciones sobre este tema que sobre la teoría del cuerpo negro. Por aquel entonces, la teoría cuántica era todavía un área de la física bastante esotérica, pero ahora se tomaba en serio por un número creciente de físicos. Además, también se empezó a sentir su presencia en la química: Walther Nernst, el pionero alemán de la química-física, fue crucial en el surgimiento del interés en la teoría cuántica. Mientras que Planck y otros estudiosos de la radiación del cuerpo negro se centraron en el campo de la radiación, y consideraban una ventaja que este campo fuera independiente de la estructura de la materia, para Nernst la teoría cuántica era importante porque podía ayudar a entender la estructura de la materia. Su trabajo sobre

la termodinámica química en la región de bajas temperaturas apoyaba la teoría de Einstein de los calores específicos. En 1911 Nernst sugirió que la teoría debía ser aplicable también a las vibraciones de moléculas de gas, una idea que fue asumida por Niels Bjerrum, un joven químico danés que trabajaba en el laboratorio de Nernst en Berlín. En trabajos realizados entre 1911 y 1914, Bjerrum aplicó la teoría cuántica tanto a los calores específicos de gases como a los espectros de absorción infrarroja de moléculas. En concreto, en 1912 cuantizó la energía rotacional de una molécula diatómica y utilizó el resultado para proponer una teoría de los espectros moleculares que rápidamente recibió confirmación experimental. El trabajo de Bjerrum, una primera contribución al área de investigación más tarde conocida como física-química, fue un importante éxito de la teoría cuántica. Durante la mayor parte de la década de 1910, las moléculas fueron más importantes que los átomos para la diseminación de la teoría cuántica.

El creciente interés en teoría cuántica puede ilustrarse por el Congreso Solvay de física, celebrado en Bruselas en noviembre de 1911, el cual fue el primero de una importante serie de encuentros internacionales de física. Ernest Solvay, un industrial y filántropo belga que había amasado fortuna inventando un nuevo método para la producción de refrescos, tenía un interés profundo, si bien algo *amateur,* en la física teórica. La combinación del dinero de Solvay y la iniciativa de Nernst dió como resultado el congreso de 1911 sobre la problemática relación entre la teoría cuántica, la teoría cinética de los gases y la teoría de la radiación. Lorentz presidió la conferencia y entre los 21 participantes invitados estaban los mejores físicos europeos, incluyendo a Planck, Nernst, Sommerfeld, Marie Curie, Rutherford, Poincaré y Einstein. No se invitó a ningún estadounidense. Aunque las discusiones en Bruselas no resultaron en ninguna respuesta concreta a las muchas preguntas formuladas, fueron útiles en el sentido de hacer que los problemas de la radiación y la teoría cuántica quedaran más definidos. Einstein apuntó que el congreso «tenía un aspecto similar a las lamentaciones en las ruinas de Jerusalén», pero al menos lo encontró socialmente estimulante. «Fue muy interesante lo de Bruselas», escribió a su amigo Heinrich Zangger, «Lorentz es un milagro de inteligencia y tacto; una obra de arte viviente [...] Poincaré estuvo en general llanamente negativo respecto a la teoría de la relatividad [...] Planck es intratable acerca de ciertas ideas preconcebidas que son, sin lugar a dudas, erróneas [...] Todo ello habría sido una delicia para los diabólicos padres jesuitas» (Mehra 1975, p. xiv). Animado por el éxito de la conferencia, Solvay decidió establecer una institución permanente, a la que dotó con un millón de francos belgas. El Instituto Internacional de Física, fundado en 1912, estaba dirigido por un consejo que consistía en nueve prominentes físicos de cinco países. El primer comité científico consistía en Lorentz y Kamerlingh Onnes de los Países Bajos, Marie Curie y Marcel Brillouin de Francia, Martin Knudsen de Dinamarca, Robert Goldschmidt de Bélgica, Nernst y Emil Warburg de Alemania y Rutherford de Gran Bretaña. Durante más de dos décadas, las conferencias Solvay eran los encuentros más prestigiosos y científicamente importantes de los físicos de elite.

El encuentro de 1911 fue organizado principalmente por Nernst, quien creía que había llegado el momento para una conferencia sobre problemas de materia y radiación a

la luz de la teoría cuántica. Principalmente como resultado del trabajo de Einstein sobre calores específicos, Nernst se había convencido de la revolucionaria importancia de la teoría cuántica, una teoría a la que no había prestado atención anteriormente. En julio de 1910 escribió a Solvay, el benefactor de la planeada conferencia, «parece que estamos en estos momentos en mitad de una reformulación revolucionaria de los cimientos de la teoría cinética de la materia hasta ahora aceptada [...] Esta concepción [de los cuantos de energía] es tan extraña a las ecuaciones de movimiento que se utilizaban anteriormente que su aceptación debe estar acompañada sin duda de una amplia reforma de nuestra intuición fundamental» (Kuhn 1978, p. 215). Planck, con quien Nernst debatió el plan, estaba de acuerdo con que la teoría cuántica era un reto importante para los conceptos clásicos de la física, pero al principio era escéptico acerca de celebrar la conferencia tan pronto como en 1911. En junio de 1910 escribió a Nernst, «soy de la opinión de que apenas la mitad de los conferenciantes en los que está pensando son conscientes de una preocupación suficientemente activa acerca de la urgente necesidad de una reforma [de la teoría] como para justificar que asistan a la conferencia. En cuanto a los mayores (Rayleigh, Van der Waals, Schuster, Seeliger) no discutiré en detalle si estarán emocionados por la idea. Pero incluso entre la gente más joven la urgencia y la importancia de estas cuestiones apenas ha sido reconocida. Entre todos los que he mencionado creo que, aparte de nosotros, sólo Einstein, Lorentz, W. Wien y Larmor estarán seriamente interesados en el asunto» (Mehra 1975, p. 5). Aunque la conferencia de Bruselas sobre «teoría de la radiación y los cuantos» incluía todas las figuras clave de la teoría cuántica, no todos los participantes se ocupaban de problemas cuánticos. Dos de los informes, realizados por Jean Perrin y Knudsen, no trataban con aspectos de la teoría cuántica. Los títulos de los informes presentados en la conferencia dan una impresión de qué materias se consideraban importantes en el área escogida de la física teórica:

- Aplicación del teorema de equipartición de la energía a la radiación (por H. A. Lorentz, 58 años).
- Teoría cinética del calor específico según Maxwell y Boltzmann (por J. H. Jeans, 34 años).
- La ley de la radiación del cuerpo negro y la hipótesis del cuanto de acción elemental (por M. Planck, 53 años).
- La teoría cinética y las propiedades experimentales de los gases perfectos (por M. Knudsen, 40 años).
- La prueba de la realidad molecular (por J. Perrin, 41 años).
- Aplicación de la teoría cuántica a problemas fisicoquímicos (por W. Nernst, 47 años).
- El cuanto de acción y fenómenos moleculares no periódicos (por A. Sommerfeld, 42 años).
- El problema de los calores específicos (por A. Einstein, 32 años).

La conferencia de Solvay no proporcionó nuevas perspectivas importantes, pero a pesar de ello, los informes y las discusiones ayudaron a establecer un entendimiento

común de cuáles eran los problemas clave de la teoría cuántica. La actitud general era cauta y algo escéptica. Quedó claro que los enigmas del cuanto estaban lejos de ser resueltos y que el estado de la teoría cuántica seguía siendo insatisfactorio. «La enfermedad h parece cada vez más incurable», escribió Einstein a Lorentz poco después del congreso. En otra carta del mismo periodo concluyó que «nadie sabe nada en realidad» (Barkan 1993, p. 68). Sin embargo pocos especialistas reconocieron que la teoría cuántica había llegado para quedarse y que marcaba el inicio de un nuevo capítulo en la historia de la física. El sentimiento fue bien expresado por el conservador Planck en un discurso de 1911 ante la Sociedad Alemana de Química: «Es seguro que la mayor parte del trabajo está sin hacer», Planck dijo, «pero el principio está hecho: la hipótesis de los cuantos nunca desaparecerá del mundo [...] No creo que esté yendo demasiado lejos si expreso la opinión de que con esta hipótesis se establece el cimiento para la construcción de una teoría que está destinada algún día a permear los rápidos y delicados sucesos del mundo molecular con una nueva luz» (Klein 1966, p. 302).

El carácter indefinido de la teoría cuántica podría ilustrarse por los intentos de Planck entre 1911 y 1914 de revisar la teoría para retener lo mayor posible de la teoría clásica de la electrodinámica. Su nueva proposición era abandonar la hipótesis de que la energía de un oscilador está cuantizada en el sentido de que los procesos de absorción y emisión de energía sean procesos discretos. Como alternativa, Planck sugirió que la absorción era un proceso continuo, mientras que la emisión se consideraba discontinua y regulada por una ley probabilística. Sobre esta base, Planck pudo derivar la ley de radiación del cuerpo negro de una manera que consideraba más satisfactoria. Al contrario que la teoría original de 1900, en la teoría de 1912 la energía de un oscilador no era nula a temperatura cero. Para $T = 0$ el resultado se convierte en $E = h\nu/2$, de ahí el nombre de «energía del punto cero». Esta sorprendente idea despertó gran interés y pronto fue aplicada a una variedad de fenómenos, incluyendo radioactividad, superconductividad y esparcimiento de rayos X. Nernst utilizó la idea incluso en especulaciones cosmológicas. La existencia de una energía del punto cero fue al final confirmada y deducida de una manera natural a partir de la mecánica cuántica en los años veinte. Pero históricamente, se originó en la incorrecta teoría de Planck de 1912.

CAPÍTULO 6

Física a bajas temperaturas

La carrera hacia el cero

La criogenia es el estudio de los fenómenos y propiedades materiales a muy bajas temperaturas, y especialmente de los métodos para producir estas temperaturas. Alrededor de 1880, la criogenia era una ciencia viviendo su infancia. A lo largo del siglo XIX, había existido interés en la condensación de gases y, en particular, en la licuefacción de los constituyentes del aire. El primer resultado importante en esta área ocurrió en 1877, cuando un ingeniero de minas francés, Louis Cailletet, anunció en un encuentro de la Academia de Ciencias de París que había observado gotitas de oxígeno líquido. El descubrimiento resultó ser doble, ya que dos días antes de que Cailletet hiciera su anuncio, un físico suizo, Raoul Pictet, había telegrafiado a la Academia en un informe que había conseguido condensar oxígeno. Fue uno de los muchos descubrimientos simultáneos independientes en la historia de la ciencia. Los dos investigadores utilizaron métodos diferentes, pero en ambos experimentos se enfrió oxígeno puro bajo presión y después se le permitió expandirse bruscamente. Unos pocos días después de haber causado la condensación de oxígeno, Cailletet repitió su éxito con el otro constituyente de la atmósfera, el nitrógeno.

Una cantidad mayor de oxígeno líquido fue producida en 1883 por los científicos polacos Szygmunt Wrobleski y Karol Olszewski, quienes modificaron el método de Cailletet de tal manera que la rápida expansión del gas no era necesaria. De esta manera pudieron observar el líquido hirviendo y no tan sólo gotitas formadas por el gas. El químico Wrobleski y el físico Olszewski trabajaban en la Universidad Jagielloniana de Cracovia, que era uno de los centros mundiales de investigación criogénica a finales del siglo. (Wrobleski murió trágicamente en 1888, en un incendio en su laboratorio.) La temperatura más baja registrada en los primeros experimentos de Cracovia era de unos 55 K, unos 35 K por debajo del punto de ebullición del oxígeno a presión normal, sin embargo, los métodos utilizados por la primera generación de físicos de bajas temperaturas eran poco eficaces y no conseguían producir grandes cantidades de gases líquidos. La situación cambió en la década de

1890, cuando se desarrollaron nuevas tecnologías de refrigeración, principalmente por Carl von Linde en Alemania, William Hampson en Inglaterra y George Claude en Francia. Linde fue un pionero de la ingeniería de refrigeración y el fundador de una compañía de éxito que desarrollaba refrigeradores para usos industriales. En 1895, a los 71 años de edad, inventó un eficaz método para la licuefacción de gases basado en el efecto Joule-Thomson. Los trabajos de Linde, Hampson y Claude se dirigían principalmente a la producción de aire líquido con propósitos industriales, pero también fueron importantes para otros fines científicos. En general, la ciencia y la tecnología se desarrollaron mano a mano en las áreas de la criogenia y la física de bajas temperaturas. Por ejemplo, la *Association Internationale du Froid* (Asociación Internacional de la Refrigeración), fundada en 1909, era una organización para los aspectos tanto científicos como industriales de las bajas temperaturas. Otro rasgo característico de la primera fase de la criogenia fue la naturaleza interdisciplinar del campo, que englobaba a químicos, físicos e ingenieros. Un tercer rasgo caracterizaba el campo, en concreto, que era muy caro comparado con lo habitual en la física experimental de aquella época. Sólo unos pocos laboratorios de física podían permitirse iniciar una investigación sobre bajas temperaturas.

A finales del siglo XIX, existía un interés creciente en alcanzar temperaturas aun más bajas, tan cerca del cero absoluto como fuera posible. La licuefacción del hidrógeno, que se pensaba que poseía el punto de ebullición más bajo de todos los gases, se convirtió en una meta atractiva de la física de bajas temperaturas, y los intentos para licuar el gas pronto se transformaron en una carrera. Los principales participantes en la carrera eran científicos en Gran Bretaña (Londres), Polonia (Cracovia) y Holanda (Leiden). Como resultado de la presión competitiva y del prestigio que suponía ser el primero en licuar el hidrógeno, y después el helio, la carrera tuvo lugar en una atmósfera de litigio, controversia sobre quién había sido el primero y afirmaciones de éxito demasiado apresuradas. Uno de los participantes fue el químico escocés James Dewar, quien trabajaba en la Royal Institution en Londres. A caballo entre la química y la física experimental, Dewar había investigado las bajas temperaturas desde 1874, y en 1892 inventó uno de los aparatos criogénicos más útiles, el criostato al vacío o vaso Dewar; o, en un lenguaje menos científico, el termo. En 1898, utilizando una modificación del método de Linde, Dewar tuvo éxito donde sus competidores habían fallado. El resultado de sus esfuerzos fueron veinte mililitros de hidrógeno líquido hirviendo, la temperatura del cual estimó sería de unos 20 K. Habiendo obtenido hidrógeno líquido prosiguió para producir el elemento en su estado sólido, lo cual consiguió en 1899. El punto triple del hidrógeno (donde las tres fases se encuentran en equilibrio) se había alcanzado, pero su temperatura no se pudo determinar directamente. Dewar estimó que la temperatura sería de unos 16 K, pero probablemente había alcanzado temperaturas incluso más bajas en sus experimentos, quizá sólo 12 grados sobre el cero absoluto. Dewar estaba compitiendo conscientemente con Olszewski en Cracovia y Kamerlingh Onnes en Leiden, y tras su victoria con el hidrógeno la carrera continuó hacia su siguiente objetivo, la licuefacción del helio.

El elemento helio era bastante novedoso por aquel entonces. Aunque su nombre y existencia fueran ya sugeridos en 1868, cuando Norman Lockyer interpretó una línea no

identificada en el espectro solar como evidencia de un nuevo elemento, fue sólo en 1895 cuando William Ramsay descubrió helio en fuentes terrestres. Al principio se creía que era «uno de los elementos más escasos», como el químico Clemens Winkler dijo en 1897. Algunos años después, en 1903, se encontró que el helio era abundante en pozos de gas natural estadounidenses, pero llevó varios años desarrollar la tecnología necesaria para extraer el helio gaseoso hasta un nivel comercial. De un precio de 2.500 dólares por pie cúbico de helio en 1915, se bajó a un precio de 3 centavos por pie cúbico en 1926. En los primeros años del siglo, cuando el helio era escaso y caro, los científicos sospechaban que su punto triple estaba por debajo del punto del hidrógeno: en consecuencia, los físicos de bajas temperaturas dedicaron sus esfuerzos a licuarlo. A la competición entre Dewar, Olzsewski y Kamerlingh Onnes se unieron Ramsay y su asistente Morris Travers. Ramsay y Travers eran los líderes mundiales en gases inertes, pero por desgracia no se llevaban bien con el irascible Dewar. El primer intento de licuar el helio por parte de Olzsewski tuvo lugar ya en 1896. Fracasó, como también lo hicieron los intentos posteriores de Dewar y Travers. Estos primeros experimentos eran de ensayo y error, en el sentido de que se llevaban a cabo sin saber cómo de baja era la temperatura que se necesitaba. Tan sólo en 1907 se estimó de manera fiable la temperatura crítica del helio, entre 5 K y 6 K. Esto era tan sólo ligeramente menor que las temperaturas más bajas obtenidas en los centros europeos de criogenia de la época, y el éxito parecía por lo tanto estar al alcance.

Los científicos británicos y polacos fueron derrotados cuando Kamerlingh Onnes anunció triunfantemente en julio de 1908, para gran vejación de Dewar, que había licuado el gas. El experimento empezó a las 5:45 a.m. del 10 de julio con 75 litros de aire líquido; éste fue utilizado para condensar 20 litros de hidrógeno, que fue a su vez utilizado para licuar 60 mililitros de helio bajo presión reducida. La primera licuefacción del helio se consiguió trece horas más tarde. Kamerlingh Onnes describió el clímax de esta manera: «Fue un momento maravilloso cuando el líquido, que parecía casi inmaterial, se vio por primera vez [...] Estaba exultante cuando pude mostrar el helio licuado a mi amigo Van der Waals, cuya teoría había sido mi guía en la licuefacción hasta el final» (Dahl 1984, p. 2). Kamerlingh Onnes intentó inmediatamente determinar si podría solidificar el elemento mediante evaporación bajo presión reducida: fracasó, y los intentos posteriores no tuvieron más éxito. El helio sólido se consiguió al final en 1924, por Willem Keesom en el laboratorio de Leiden. Aun así, Kamerlingh Onnes había producido el primer helio líquido de la historia y en el proceso alcanzó una nueva temperatura récord, obteniendo temperaturas tan bajas como 1 K en 1910. En este punto, cuando resultó técnicamente imposible reducir más la temperatura, tomó una pausa y decidió investigar las propiedades físicas de las sustancias en el régimen de temperaturas ahora accesible entre 1 K y 6 K.

Kamerlingh Onnes y el laboratorio de Leiden

Heike Kamerlingh Onnes, director y cabeza indiscutible del laboratorio de Leiden desde 1882 hasta su jubilación en 1922, había empezado su trayectoria en la física con estu-

dios bajo la dirección de Kirchhoff en Heidelberg a comienzos de la década de 1870. Su cátedra en Física experimental en la Universidad de Leiden fue la primera de su clase en Holanda. Alrededor de 1893, se embarcó en un programa de investigación criogénica a gran escala y pronto la mayor parte del trabajo en el laboratorio estaba centrado en bajas temperaturas (pero no totalmente: fue aquí donde Zeeman descubrió el efecto magnético sobre las líneas espectrales en 1896). Kammerlingh Onnes planeó su programa de investigación a largo plazo sistemáticamente y con grandes dotes como gerente, como un general o un ejecutivo. Al contrario de los laboratorios tradicionales de un Röntgen, un Rutherford o un(a) Curie, Kamerlingh Onnes convirtió su departamento en una fábrica científica dirigida eficazmente y bien financiada, donde la pericia técnica y logística contaba tanto como la imaginación científica. Por ejemplo, en vez de depender de partes de aparatos de fabricación casera, Kamerlingh Onnes importó técnicos extranjeros y organizó una escuela de fabricantes de instrumentos y sopladores de vidrio.

La organización profesional del laboratorio de Leiden, sustentada por amplios recursos económicos asegurados en parte gracias a las conexiones personales del director con industriales holandeses, lo hicieron superior a las instituciones rivales en Cracovia, Londres y París. En 1906, el laboratorio operaba un eficiente licuefactor de hidrógeno, capaz de producir 4 litros por hora, y durante una década después de 1908 tenía el monopolio mundial de helio líquido. Fue sólo tras el fin de la guerra cuando el helio líquido empezó a producirse en otros sitios, primero en la Universidad de Toronto, luego en el National Bureau of Standards en Washington y en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt en Berlín. Incluso entonces, Leiden seguía sin rival como el centro mundial de física de bajas temperaturas. El suministro de helio, por aquel entonces todavía un elemento raro y caro, era de crítica importancia para el laboratorio de Leiden. Kamerlingh Onnes obtuvo su primer helio calentando arena de monacita radiactiva de Carolina del Norte y purificando posteriormente el gas liberado. Otros suministros del precioso gas se derivaban de la torianita, otro mineral radiactivo, o se recibían como regalos de compañías químicas extranjeras.

Kamerlingh Onnes era un director autocrático de la vieja escuela, clasista y profundamente conservador. Dirigía el laboratorio como un «déspota benevolente», como Hendrik Casimir, el físico holandés y más tarde director de los Laboratorios de Investigación Philips, le describiera una vez. Sin embargo el déspota era apreciado y capaz de estimular en sus empleados científicos y técnicos un espíritu de compromiso y colaboración. Para asegurar la amplia circulación del trabajo del laboratorio, en 1885 Kamerlingh Onnes fundó la revista interna *Comunicaciones del Laboratorio Físico de Leiden*, cuyos artículos se publicaban en inglés o, menos frecuentemente, en francés y alemán. Los artículos eran generalmente traducciones o revisiones de artículos publicados en las *Actas de la Real Sociedad* (de Amsterdam) y se reimprimían muchas veces en revistas extranjeras. Tanto si había participado directamente en la investigación como si no, Kamerlingh Onnes consideraba tener el derecho, como director, de aparecer como coautor de todas las publicaciones que salían del laboratorio, una política que podría explicar su sorprendente productividad de artículos científicos.

Según el laboratorio ascendía para convertirse en el principal centro mundial de física de bajas temperaturas, atraía un número cada vez mayor de visitantes que querían utilizar sus instalaciones únicas. Siempre que se necesitaba investigar un fenómeno a muy bajas temperaturas, Leiden era el sitio para hacerlo, y existieron muchos fenómenos así. Para mencionar sólo unos pocos ejemplos, en los primeros años del nuevo siglo, Marie Curie realizó experimentos en Leiden para medir si la vida media de las sustancias radiactivas se veía influida por el frío extremo. (Pierre Curie investigó el mismo problema, pero fue a Londres a trabajar con Dewar.) En 1908 Jean Becquerel de París examinó el comportamiento de fenómenos magneto-ópticos hasta 14 K y halló que los experimentos con hidrógeno líquido apoyaban sus controvertidas hipótesis sobre los electrones positivos. Becquerel y, nominalmente, Kamerlingh Onnes concluyeron que «las observaciones en hidrógeno líquido parecen proporcionar un fuerte apoyo al argumento a favor de la existencia de electrones positivos» (Kragh 1989, p. 217). Esta vez, Kamerlingh Onnes probablemente se arrepintió de su automática coautoría. El «fuerte apoyo» no fue aceptado por otros físicos que declinaron aceptar la existencia de electrones positivos.

La identidad del laboratorio de Leiden no estaba formada sólo de edificios, aparatos y organización, sino también del tipo de credo metodológico que se derivaba de la perspectiva de la ciencia de su director. Se ponía gran énfasis en el valor de medidas cuantitativas y precisas, ya que se mantenía que éstas eran la esencia de la ciencia, mientras que la teoría y observaciones cualitativas se consideraban menos importantes. En 1882, en su clase inaugural en la Universidad de Leiden, Kamerlingh Onnes expresó el credo de esta manera: «De acuerdo con mi punto de vista, perseguir investigaciones cuantitativas, es decir, establecer relaciones entre medidas y fenómenos, debería tener preferencia en la práctica experimental de los físicos. *Por la medida hacia el conocimiento [door meten tot weten],* me gustaría escribir como lema sobre la entrada de todos los laboratorios de física» (Casimir 1983, p. 160). Esta actitud, una parte importante del espíritu de Leiden, era por supuesto compartida por otros científicos además de Kamerlingh Onnes. El énfasis en las medidas cuantitativas era una característica típica de la física de entre siglos. Al físico alemán Friedrich Kohlrausch, un importante organizador de institutos físicos y escritor de libros de textos influyentes, se le conocía como «el maestro de la física de la medida». De acuerdo con Kohlrausch, la medida estaba en el corazón de la física. «Medir la naturaleza es una de las actividades características de nuestro tiempo», proclamó en 1900 (Cahan 1989, p. 129). La actitud de Kohlrausch y Kamerlingh Onnes estaba extendida entre los experimentales y quizá en particular entre los espectróscopos. Por ejemplo, quedó expresada muy claramente por el comité Nobel en 1907, cuando el premio fue entregado a Michelson: «En cuanto a la física, se ha desarrollado notablemente como una ciencia de precisión, de tal manera que podemos afirmar justificadamente que la mayoría de los grandes descubrimientos en física están basados en su mayor parte en el alto grado de precisión que puede obtenerse ahora en medidas tomadas durante el estudio de los fenómenos físicos. [La precisión de la medida] es la auténtica raíz, la condición esencial, de nuestra

penetración en las profundidades de las leyes de la física, nuestra única vía hacia nuevos descubrimientos» (Holton 1988, p. 295).

La predilección por la medida de alta precisión no implica necesariamente una devaluación de la teoría ni de la observación. En algunos casos, los experimentos pueden parecer justificados por sí mismos, pero en otros se consideraban dirigidos a propósitos más elevados, como el descubrimiento y el avance del entendimiento de la naturaleza. Entre siglos, se argumentaba a menudo que las medidas de precisión conducirían a fenómenos cualitativamente nuevos y de este modo proporcionaría una transformación dialéctica de cantidad en cualidad (por usar una expresión marxista clásica). Esto es lo que el comité del Nobel sugirió al presentar el premio a Michelson, y era ciertamente una idea nada extraña para el físico estadounidense. En un comentario de 1902 sobre las leyes fundamentales de la física y la posibilidad de descubrimientos futuros escribió: «Se ha encontrado que existen aparentes excepciones a la mayoría de estas leyes, y esto es cierto en particular cuando se llevan las observaciones al límite, es decir, cada vez que las circunstancias del experimento son tales que se pueden examinar casos extremos». Tras mencionar algunos ejemplos así, Michelson continuaba, «se podrían mencionar otros muchos ejemplos, pero éstos son suficientes para justificar la afirmación de que «nuestros descubrimientos futuros deberán buscarse en la sexta posición decimal». Se sigue que todo método que facilite la precisión de la medida es un posible factor en el descubrimiento futuro» (Michelson 1902, p. 24). Esto es lo que se ha denominado «el romance del sexto decimal»: la creencia o esperanza de que si los científicos conocen un dominio de la naturaleza hasta cierta escala, un incremento en el poder de observación que proporcione acceso a un escala ligeramente superior pueda llevar a nuevos y espectaculares resultados. Si los científicos continúan realizando sus experimentos de manera un poco más sofisticada, con más precisión, a energías más altas, temperaturas más bajas, más resolución, y en consecuencia a mayor coste, valdrá claramente la pena. Naturalmente, el proceso no es automático, no hay garantía de que un mayor precisión o gama experimental vaya a conducir a descubrimientos. Por otro lado, el punto de vista de Michelson de hecho tenía ciertamente una base; es decir, estaba apoyado en la historia de la ciencia. La física posterior ha continuado proporcionando evidencias a favor del romance del sexto decimal. Michelson claramente veía que su experimento sobre la corriente del éter, que de acuerdo a él condujo a la teoría de la relatividad, pertenecía a esta clase. El descubrimiento de la superconductividad en 1911 es quizá un ejemplo aún mejor.

La filosofía de Leiden de que la medida conducía al conocimiento se ha denominado «fenomenalismo sofisticado» y debería distinguirse del crudo empirismo en el que los experimentos reemplazan, en vez de servir de suplemento a la labor teórica. A pesar de su énfasis en experimentos de precisión, el programa de investigación de Kamerlingh Onnes estaba relacionado con la teoría. Lo que puede parecer una obsesión con la conquista de nuevas gamas de bajas temperaturas no estaba motivado tan sólo por simple curiosidad o por un deseo de reclamar territorio ignoto antes que sus competidores (aunque estos factores tuvieron sin duda su papel). Al contrario que Michel-

son y otros archiexperimentales, Kamerlingh Onnes contaba con una sólida educación en matemáticas y estaba profundamente inspirado por teóricos holandeses como Lorentz y Johannes van der Waals. Antes de iniciar su gran programa en criogenia, había trabajado en termodinámica y física molecular, y estaba especialmente interesado en comprobar las consecuencias de la teoría molecular de Van der Waals. En 1880 Van der Waals había formulado la «ley de estados correspondientes», que Kamerlingh Onnes desarrolló independientemente al año siguiente. De acuerdo con esta ley, todas las sustancias obedecen a la misma ecuación de estado cuando su presión, temperatura y volumen se expresan como múltiplos de los valores que estas variables tienen en el punto crítico. En 1894 Kamerlingh Onnes formuló de manera clara la base teórica para embarcarse en un programa de licuefacción de gases: «Me vi encaminado a trabajar con gases condensados debido al estudio de la ley de estados correspondientes de Van der Waals. Me parecía altamente deseable analizar las líneas isotérmicas de los gases permanentes, especialmente del hidrógeno, a muy bajas temperaturas» (Gavroglu y Goudaroulis 1989, p. 51). El mismo mensaje, la íntima conexión entre los experimentos a bajas temperaturas de Leiden y las teorías de Van der Waals, estaba contenido en la afirmación de Kamerlingh Onnes en 1908 arriba citada, después de conseguir licuar el helio con éxito.

Superconductividad

Una de las propiedades investigadas en el laboratorio de Leiden era la conductividad eléctrica en los metales. La teoría generalmente aceptada entonces se basaba en un trabajo que el físico alemán Paul Drude había publicado en 1900, en gran parte la misma teoría que se presenta hoy en día en los libros de texto de nivel universitario. Drude sugirió que la conducción metálica era el resultado del movimiento de electrones libres bajo la influencia de un campo eléctrico externo, y que los electrones que originalmente supuso llevaban cargas tanto positivas como negativas, tenían propiedades como las de un gas. En un metal, los electrones de conducción se suponían en equilibrio térmico con los iones y átomos neutros. Suponiendo por simplicidad que todos los electrones poseen la misma velocidad técnica u, y que u es mucho mayor que la velocidad de flujo, Drude derivó para la conductividad eléctrica (la inversa de la resistividad) una expresión de la forma $\sigma = e^2 n \lambda T^{-1/2}$; aquí, λ es el camino libre medio y n el número de electrones libres por unidad de volumen. En 1905 Lorentz desarrolló una teoría más sofisticada sustituyendo la suposición poco realista de electrones de igual velocidad por velocidades electrónicas distribuidas de acuerdo a la ley de Maxwell-Boltzmann. Sin embargo, tras largos cálculos, llegó a una fórmula que difería de la de Drude sólo en un factor numérico. La teoría de la conducción eléctrica se continuó desarrollando en versiones aun más sofisticadas de J. J. Thomson, Owen Richardson, Niels Bohr y otros. En estas versiones, de 1910 a 1915, los electrones en un conductor metálico se concebían como un gas o vapor que satisfacían la ley de los gases ideales. Se esperaba de esta manera encontrar un mecanismo para la interacción entre

electrones y átomos del metal que explicara la ley de radiación del cuerpo negro; sin embargo no se encontró una explicación satisfactoria y las teorías electrónicas no obtuvieron más éxito a la hora de explicar con precisión la variación de la resistencia con la temperatura.

Se sabía experimentalmente que la resistencia de los metales puros variaba proporcionalmente con la temperatura absoluta, es decir, $\sigma \sim T^{-1}$, al menos por encima de los 20 K. Esto presentaba un problema, ya que estaba de acuerdo con la fórmula de Drude-Lorentz sólo si se suponía arbitrariamente que $n\lambda \sim T^{-1/2}$, y ni la teoría de Drude ni sus sucesoras eran capaces de calcular n y λ como funciones de T. Además, experimentos realizados a muy bajas temperaturas durante la primera década del siglo estaban en desacuerdo tanto con la dependencia de $T^{-1/2}$ como con la de T^{-1}. Investigaciones realizadas por Dewar y otros sobre la dependencia de la resistencia con la temperatura en un entorno del punto de ebullición del hidrógeno indicaban que la resistencia como función de la temperatura presentaba una tendencia a aplanarse para temperaturas muy bajas. Esto se tomó como una implicación de una de dos posibilidades: o bien la resistencia tendería a un valor distinto de cero asintóticamente, o alcanzaría un mínimo y entonces, para temperaturas incluso más bajas, se incrementaría indefinidamente. Se suponía de manera general que la segunda posibilidad estaba bien de acuerdo con la teoría. Cerca del cero absoluto se suponía que los electrones libres «se congelarían» y se condensarían sobre los átomos; entonces la densidad de electrones libres tendería a cero y, de acuerdo con la fórmula de Drude-Lorentz, la resistencia se incrementaría drásticamente. Kamerlingh Onnes, entre otros, encontraba esta hipótesis atractiva. En 1904 la describió como sigue:

> Parece como si el vapor de electrones que llena el espacio del metal a bajas temperaturas se condensa más y más sobre los átomos. Por lo tanto, la conductividad, como Kelvin expresó por primera vez, alcanzará un máximo a una temperatura muy baja, disminuirá entonces de nuevo hasta que se alcance el cero absoluto, en el cual un metal no conduciría en absoluto, igual que un vidrio. La temperatura del máximo de la conductividad [se encuentra] probablemente varias veces por debajo de la del hidrógeno líquido. A una temperatura mucho menor aún, no quedaría ningún electrón libre, la electricidad estaría congelada, por así decir, en el metal. (Dahl 1984, p. 6)

Armado con sus cantidades de helio líquido recientemente producidas, Kamerlingh Onnes decidió en 1910 examinar la cuestión de manera sistemática. Los experimentos se efectuaron en colaboración con Cornelis Dorsman y Gilles Holst, y fue Holst quien realmente llevó a cabo las medidas. Sin embargo el artículo fue firmado sólo por Kamerlingh Onnes. Los holandeses al principio utilizaron una resistencia de platino y compararon sus datos con medidas anteriores de resistencias de oro de pureza conocida. Los resultados hicieron que Kamerlingh Onnes concluyera, «parece que descendiendo a temperaturas de helio la resistencia disminuye aun más, pero que cuando estas temperaturas se alcanzan, la resistencia adquiere un valor constante bastante

independiente de la temperatura individual a la cual ha sido llevada» (*ibid.*). Se dio cuenta de que incluso las pequeñas impurezas podían afectar al resultado significativamente y creyó que éstas enmascaraban la verdadera variación de la resistencia con la temperatura. Observando que la muestra más rica en oro mostraba menos resistencia que la otra, sugirió que la resistencia de los metales puros se haría cero asintóticamente cuando la temperatura se aproximara a cero y sería prácticamente cero a 5 K. Ésta era una suposición arriesgada y, como la mayoría de las suposiciones arriesgadas, era falsa.

En los nuevos experimentos de 1911 se usó mercurio, que se podía obtener en una forma altamente purificada. Un experimento inicial, anunciado en abril, parecía confirmar la sospecha de Kamerlingh Onnes sobre una resistencia que se anulaba asintóticamente. Pero cuando se llevaron a cabo experimentos más precisos al mes siguiente, éstos mostraron una variación que era totalmente inesperada: un cambio abrupto a resistencia cero a una temperatura cercana a 4,2 K (gráfico 6.1). En su discurso del Nobel de 1913, Kamerlingh Onnes describió el descubrimiento como sigue: «El expe-

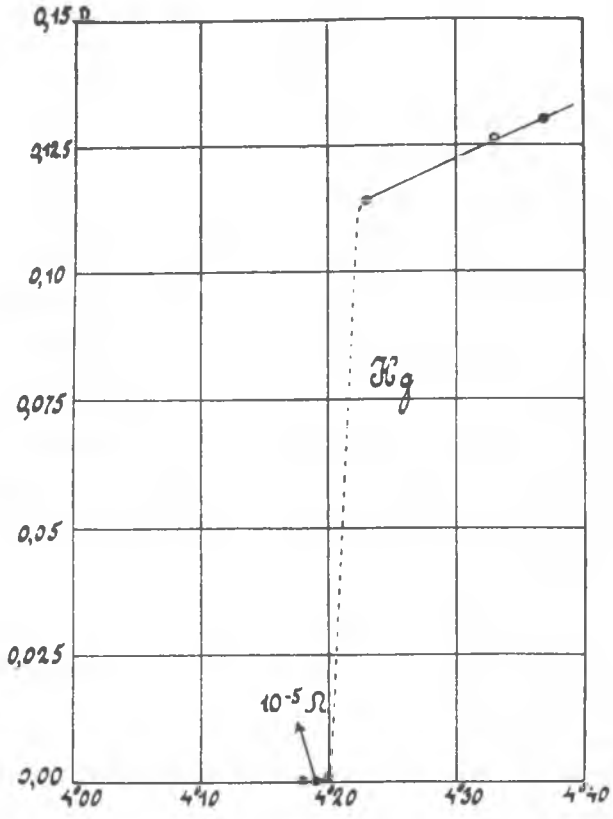


Gráfico 6.1. La superconductividad al descubierto: curva de Kamerlingh Onnes de 1911 de resistencia de mercurio *versus* temperatura.

rimento no dejaba duda de que, dentro de la precisión de la medida, la resistencia desaparecía. Al mismo tiempo, sin embargo, sucedía algo inesperado. La desaparición no tenía lugar gradualmente sino *abruptamente*. Desde 1/500 la resistencia a 4,2 K cae a una millonésima parte. A la temperatura más baja, 1,5 K, se pudo establecer que la resistencia había pasado a ser menos que una diezmillonésima parte de la correspondiente a temperatura normal. Así pues, el mercurio a 4,2 K ha entrado en un nuevo estado, el cual, debido a sus propiedades eléctricas particulares, puede ser denominado estado de superconductividad». Experimentos adicionales efectuados entre 1911 y 1913 probaron que la superconductividad del mercurio era definitiva, mientras que ni el platino ni el oro mostraban un comportamiento similar. Sin embargo, el mercurio no era una anomalía, ya que en diciembre de 1912 resultó que el estaño y el plomo eran también superconductores; la desaparición de la resistencia se encontró en 3,78 K para el estaño y 6,0 K para el plomo. Al contrario de lo que se esperaba, se vio que las impurezas no tenían ningún efecto en el nuevo fenómeno. Además, quedó definitivamente confirmado que la desaparición de la resistencia ocurría abruptamente y que las «rodillas» en la curva de resistencia eran efectos experimentales.

El término «superconductividad» apareció por primera vez en un artículo escrito por Kamerlingh Onnes a comienzos de 1913. Ahora había un nombre para el desconcertante fenómeno, pero había una total falta de entendimiento de lo que el nombre ocultaba. Durante un tiempo, Kamerlingh Onnes no se dio cuenta del todo de la novedad del fenómeno y continuaba considerándolo un caso extremo de conducción eléctrica ordinaria, es decir, dentro del marco de la teoría de Drude-Lorentz. Quizá, pensaba, estaba causado por un brusco incremento en el camino libre medio de los electrones. Esta idea, junto con los resultados obtenidos para el plomo y el estaño le llevaron a creer que la superconductividad podría ser un estado general a bajas temperaturas para todos los metales. Pero éste era un asunto que sin duda había que decidir experimentalmente, y los experimentos probaron que la superconductividad estaba limitada a unos cuantos elementos. Dentro del área de la superconductividad experimental se progresó rápidamente, a pesar de la falta de entendimiento teórico. En 1913 se construyó el primer imán superconductor en Leiden y en 1914 Kamerlingh Onnes y su equipo comenzaron un estudio del efecto de fuertes campos magnéticos en el estado superconductor. Una nueva discontinuidad apareció, en concreto, la existencia de un cierto valor crítico del campo por encima del cual la resistencia nula desparecía de manera abrupta y misteriosa. Se comprobó que la fuerza del campo crítico se incrementaba a temperaturas más bajas. El efecto de un campo magnético supercrítico tenía por lo tanto el mismo efecto que calentar el metal. Y otro nuevo fenómeno se dejaba para los desconcertados teóricos.

Se afirma a veces que Kamerlingh Onnes también descubrió la superfluidez en 1911. La débil base de esta afirmación es que el grupo de Leiden realizó medidas de la variación de la densidad del helio líquido con la temperatura y obtuvo resultados que sugerían una densidad máxima cercana a los 2,2 K. Sin embargo, el cambio brusco en densidad –una manifestación de la superfluidez del helio– quedó establecido tan sólo

varios años tras la Primera Guerra Mundial, en 1924. Incluso entonces, Kamerlingh Onnes no lo consideró un fenómeno particularmente interesante que mereciera un estudio detallado: aunque lo que observara en 1911 era realmente una propiedad superfluida, hicieron falta muchos años hasta que quedó claro que era una manifestación de un fenómeno genuinamente nuevo. La observación es una precondición necesaria pero no suficiente para el descubrimiento, y fue sólo en 1938 cuando la superfluidez consiguió el estado de descubrimiento.

Aunque el descubrimiento de la superconductividad fue un brillante pico en el trabajo del laboratorio de Leiden, fue sólo una parte de muchas en un programa de investigación de amplias miras. Tanto antes como después de 1911, Kamerlingh Onnes y su grupo pasaban la mayor parte del tiempo investigando otras propiedades a bajas temperaturas, incluyendo el efecto Hall, la piezoelectricidad, la ley de Curie, la magneto-óptica y la radiactividad. Fue por «sus investigaciones de las propiedades de la materia a bajas temperaturas que condujeron, entre otras, a la producción de helio líquido» por lo que Kamerlingh Onnes obtuvo el premio Nobel en 1913. La superconductividad, en retrospectiva con mucho el descubrimiento más importante, no se mencionaba explícitamente en el discurso de presentación. El hecho de que la superconductividad no causara una conmoción también quedó reflejado en el primer congreso Solvay en 1911, que tuvo lugar medio año después del descubrimiento. En Bruselas, Kamerlingh Onnes proporcionó una explicación detallada sobre medidas de la resistencia eléctrica en el cual sugirió vagamente que la desaparición de la resistencia podría explicarse con la ayuda de la teoría cuántica. En su discurso del Nobel sugirió de manera similar que la superconductividad podía estar conectada con «la energía de los vibradores de Planck». El breve debate que siguió a la explicación de Solvay, limitada a una pregunta de Paul Langevin, indica que los físicos reunidos en Bruselas no estaban particularmente interesados en el fenómeno.

Rápidamente tras el descubrimiento de 1911 aparecieron intentos de aplicar la teoría cuántica para desarrollar una teoría mejorada de la conducción eléctrica, y así explicar la superconductividad. Una de las teorías más prometedoras, propuesta por Wilhelm Wien en 1913, se basaba en la suposición de que la conducción eléctrica estuviera esencialmente determinada por el camino libre medio de los electrones. A bajas temperaturas, la teoría cuántica de Wien llevaba a una dependencia cuadrática de la resistencia con la temperatura, pero no conseguía explicar la abrupta caída en la resistencia de los metales superconductores. Otras aplicaciones de la teoría cuántica sugerida por Keesom en 1914 y Frederick Lindemann en 1915 no tuvieron más éxito. ¿Cuál era la causa del abrupto cambio en la resistencia? ¿Por qué estaba el fenómeno restringido a unos pocos de los metales en la tabla periódica? La teoría no lo podía explicar; sin embargo, a pesar del fracaso, no había un sentimiento de crisis debido a la anomalía.

Si la superconductividad no se podía entender teóricamente, quizá podría usarse tecnológicamente. En su origen, los físicos de Leiden se dieron cuenta de la posibilidad de construir poderosos electroimanes superconductores, en los que no hubiera pérdida por calor incluso para corrientes muy altas. Estos poderosos imanes no eran sólo in-

teresantes científicamente, sino que también serían de gran utilidad en la industria electrotécnica. Resultó sin embargo que los fuertes campos magnéticos actuaban en contra del estado superconductor; el sueño de los súper-electroimanes tuvo por tanto que ser archivado, al menos por el momento. A principios de 1914, se realizaron experimentos con un anillo de plomo superconductor al cual se le aplicó un campo magnético variable de una fuerza de hasta 10 kilogauss. A pequeñas fuerzas del campo la resistencia era cero, pero a un valor crítico de unos 600 gauss la resistencia se incrementaba espectacularmente, de una manera análoga a la variación de la resistencia con la temperatura. «La resistencia se incrementa [...] como si la introducción del campo magnético tuviera el mismo efecto que calentar el conductor», escribió Kamerlingh Onnes. Un examen más detallado de la relación entre resistencia y campo magnético tuvo que esperar hasta los años veinte. Con la llegada de la Primera Guerra Mundial, el suministro de helio a Leiden se cortó temporalmente y, sin helio líquido, no se podían estudiar experimentalmente ni la superconductividad ni otros fenómenos a temperaturas por debajo de 5 K.

Los experimentos a bajas temperaturas en Leiden continuaron después de que la guerra terminara y se aseguraran nuevos suministros de helio. En 1919 se estableció que otros dos metales, el talio y el uranio, eran superconductores. Se comprobó que las temperaturas de desaparición eran 2,32 K para el talio y unos 7,2 K para el uranio. Por el lado teórico, siguieron los intentos de entender el fenómeno, pero desde luego no se progresaba. Las primeras dos conferencias de Solvay tras la guerra pueden ilustrar el estado poco satisfactorio del conocimiento de la superconductividad. En la conferencia de 1921 Kamerlingh Onnes impartió un seminario sobre «los superconductores y el modelo de Rutherford-Bohr», en el cual informaba sobre los últimos experimentos de Leiden. Sugirió que la superconductividad era un fenómeno no clásico que sólo podía entenderse en términos del átomo cuántico de Bohr, pero ni Kamerlingh Onnes ni otros podían decir de qué manera. Resumía su informe con ocho preguntas, que incluían «dado que los átomos de Rutherford-Bohr se unen para formar un metal, ¿qué sucede con sus electrones? ¿Pierden toda o sólo parte de su energía cinética?».

El tema del cuarto congreso de 1924 fue «la conductividad eléctrica de los metales» y en él varios participantes discutieron sobre superconductividad. Lorentz, que habló sobre la teoría electrónica de los metales, concluyó con vaguedad que las órbitas electrónicas en los estados superconductores deben ser irregulares o «particulares». Kamerlingh Onnes discutió una posible conexión entre las teorías electrónicas de los pocos elementos superconductores de acuerdo con la nueva teoría de Bohr para el sistema periódico. Langevin sugirió que la desaparición discontinua de la resistencia era quizá el resultado de un cambio de fase en el material. Al parecer, no tenía constancia de que la sugerencia ya se había comprobado experimentalmente en Leiden, donde los análisis con rayos X de Keesom probaron que no había cambio de fase. Owen Richardson propuso un modelo de acuerdo al cual los electrones se moverían libremente a lo largo de órbitas tangentes entre sí y Auguste Piccard se preguntaba si quizá los relámpagos eran un fenómeno superconductor a temperaturas normales.

Las discusiones de Solvay y otros intentos contemporáneos para entender la superconductividad hicieron que el tema estuviera más cerca de una explicación que antes de la guerra. Como Einstein escribió en 1922, en su única contribución a la literatura sobre superconductividad, «con nuestra amplia ignorancia sobre la mecánica cuántica de sistemas compuestos, estamos lejos de ser capaces de componer una teoría con estas vagas ideas. Sólo podemos apoyarnos en los experimentos» (Dahl 1992, p. 106). Por cierto, ésta es posiblemente la primera vez que el término «mecánica cuántica» aparecía en una publicación científica.

Cuando la amplia ignorancia sobre mecánica cuántica disminuyó drásticamente después de 1925, resultó que un entendimiento teórico de la superconductividad no se seguía de manera sencilla de la nueva teoría de los cuantos. La superconductividad recibió al final una explicación mecánico-cuántica satisfactoria, pero hizo falta mucho tiempo y muchos intentos fallidos hasta que el extraño fenómeno fuera totalmente entendido. Una teoría fenomenológica fue desarrollada en 1935 por los hermanos Fritz y Heinz London, y en 1957 la superconductividad fue finalmente explicada en términos microscópicos por los estadounidenses John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer. Examinaremos este desarrollo posterior en el capítulo 24.

CAPÍTULO 7

La relatividad de Einstein y de otros

Las transformaciones de Lorentz

La teoría de la relatividad tiene sus raíces en la óptica del siglo XIX. Con el éxito de la teoría ondulatoria de la luz de Augustin Fresnel, tomó relieve el problema de los cuerpos moviéndose a través del éter. De acuerdo con una teoría que Fresnel había propuesto en 1818, un cuerpo móvil transparente arrastraría parcialmente al éter. En tal caso, la velocidad de la luz que se propagara a través de un cuerpo que se mueva con una velocidad v relativa al éter sería modificada por una fracción de la velocidad del cuerpo, que dependería de la cantidad v/c, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. La teoría de Fresnel explicaba un gran número de experimentos ópticos posteriores que mostraban que era imposible detectar, al primer orden en v/c, el movimiento de la tierra a través del éter. Cuando las teorías elásticas de la luz se reemplazaron por la teoría electromagnética de Maxwell, la situación era la misma: cualquier teoría de la electrodinámica de cuerpos móviles tenía que incluir el «arrastre de Fresnel». En su primera teoría electrónica de la teoría de Maxwell, publicada en 1892, Lorentz interpretaba el arrastre de Fresnel como un resultado de la interacción de la luz y las partículas cargadas («iones», más tarde electrones) en el cuerpo móvil. Sin embargo, Lorentz estaba preocupado por que su teoría no fuera capaz de explicar un experimento que el físico americano Albert Michelson y su colaborador Edward Morley habían realizado cinco años antes y que Michelson había realizado por primera vez en 1881.

El famoso experimento de Michelson-Morley en 1887 fue un intento de medir el movimiento de la tierra relativo al éter mediante una técnica de interferometría avanzada. El experimento se desarrolló en la Case School for Applied Science en Cleveland, Ohio, donde Michelson era profesor de física. Se esperaba que no se detectaran efectos de primer orden, pero el experimento de Michelson-Morley tenía una precisión de segundo orden, es decir, con dependencias de la minúscula cantidad $(v/c)^2$. Según la teoría de Lorentz, el arrastre del éter debería ser detectable a este orden de precisión, al

contrario del resultado nulo del experimento. La falta de un movimiento detectable de la tierra a través del éter mundial fue una sorpresa tanto para teóricos como para experimentales. En vez de aceptar el resultado, durante un tiempo Michelson consideró el experimento un fracaso. «Dado que el resultado del experimento original fue negativo, el problema todavía requiere una solución», mantenía (Holton 1988, p. 284). El desacuerdo entre teoría y experimentación causó que Lorentz modificara su teoría suponiendo lo que más tarde se denominó la contracción de Lorentz, es decir, que la longitud de un cuerpo que se mueva en la dirección de la tierra se reducirá en un factor $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ o, a segundo orden de $\beta = v/c$, $1 - \beta^2/2$. A la cantidad γ se la conoce como el factor de Lorentz. Sin que Lorentz lo supiera, el físico irlandés George FitzGerald había propuesto una explicación similar en 1889, aunque sin incluir la fórmula; por esta razón, a veces se denomina como la contracción de FitzGerald-Lorentz. Tanto FitzGerald como Lorentz suponían que la hipotética contracción estaba causada por cambios en las fuerzas moleculares, pero en ese momento ninguno de los dos podía proporcionar una explicación de la suposición.

La primera explicación del resultado de Michelson por parte de Lorentz fue claramente *ad hoc* y ni siquiera estaba basada en su teoría electrodinámica. Durante la siguiente década avanzó mucho en el desarrollo de la teoría, y en 1899 el teórico holandés fue capaz de derivar la contracción en longitud a partir de fórmulas de transformación más generales entre las coordenadas de un cuerpo que se mueve a través del éter y las de uno que está en reposo con respecto al éter. Lorentz escribió estas transformaciones en una forma más completa en 1904, la misma forma en la que las conocemos hoy, pero no fue, sin embargo, el primero en publicar las «transformaciones de Lorentz» completas. Como una transformación puramente matemática, se pueden encontrar en un trabajo sobre el efecto Doppler publicado por Woldemar Voigt ya en 1887. Más al caso, en 1900 Larmor derivó las ecuaciones a partir de su propia versión de la teoría electrónica. Mediante las transformaciones de Lorentz-Larmor, el resultado nulo del experimento de Michelson-Morley se podía explicar fácilmente. De hecho, se seguía de la teoría de Lorentz que no podían existir efectos detectables de un movimiento uniforme a través del éter, no solamente al segundo orden en v/c, sino también a todos los órdenes.

Las transformaciones de Lorentz constituyeron el núcleo formal de la teoría especial de relatividad, y en una primera impresión podía por tanto parecer que la teoría de Einstein había sido precedida por las teorías electrónicas de Lorentz y Larmor. Sin embargo, esto no fue así en absoluto. A pesar de haber obtenido las mismas transformaciones que Einstein en 1905, Lorentz las interpretaba de una manera muy diferente. Primero, la teoría de Lorentz era dinámica, ya que las transformaciones se podían derivar de una causa física: la interacción entre el éter y los electrones del cuerpo en movimiento. La contracción en longitud se veía como un efecto de compensación que se debía al movimiento del cuerpo a través del éter. La tierra, según Lorentz, se movía realmente a través del éter, sólo que el viento del éter no era mensurable, de acuerdo con el resultado de Michelson. En segundo lugar, el éter de Lorentz era una parte esen-

cial de su teoría, ya que funcionaba como un marco de referencia absoluto. Por ejemplo, mantenía (de manera implícita en 1904 y explícita en 1906) la existencia de la simultaneidad absoluta. El hecho de que este concepto no esté de acuerdo con las interpretaciones modernas de la transformación del tiempo sólo pone de manifiesto la diferencia entre las teorías de Lorentz y Einstein. En ambas teorías, la transformación se escribe $t' = \gamma(t - vx/c^2)$, siendo t' el tiempo en el sistema que se mueve con velocidad v con respecto al sistema (x,t). Pero Lorentz consideraba esta transformación una herramienta matemática, y que el «tiempo local» t' no tenía significado real. Sólo existía, creía él, un tiempo real t (que él llamaba tiempo general). Otro aspecto en la diferencia de interpretaciones era que Lorentz no llegaba a la fórmula relativista para la suma de velocidades, la cual, en el marco relativista, se sigue directamente de las transformaciones cinemáticas.

Aunque Lorentz, Larmor y la mayoría de los demás físicos seguían apegados al éter y los conceptos asociados de espacio y tiempo absolutos, también había voces disidentes. Ernst Mach había criticado fuertemente el concepto de Newton de espacio absoluto, y su crítica, de base filosófica, era bien conocida, por supuesto también por el joven Einstein. Mach también criticaba la noción de Newton de un tiempo absoluto (como otros antes que él), que mantenía era metafísica ya que no se apoyaba ni en la experiencia ni en la intuición. Refiriéndose a la crítica de Mach de la cosmovisión mecánica en su libro *The Science of Mechanics* de 1889, Einstein recordaba en sus notas autobiográficas que «este libro ejerció sobre mí una profunda influencia a este respecto cuando era estudiante» (Schilpp 1949, p. 21).

Ningún boceto de la prehistoria de la relatividad, por breve que sea, puede evitar mencionar a Henri Poincaré a la vez que a Lorentz. Basándose en su concepción convencionalista de la ciencia, sobre 1900 el matemático francés preguntaba si a la simultaneidad de dos eventos se le podía otorgar algún significado objetivo. Ya en 1898 escribió, «la luz tiene una velocidad constante [...] este postulado no puede ser verificado mediante la experiencia [...] proporciona una nueva regla para la definición de simultaneidad» (Cao 1997, p. 64). Dos años después, en el congreso mundial de física de París, Poincaré discutió sobre si el éter realmente existía. Aunque no respondió negativamente a la pregunta, era de la opinión de que el éter era como mucho un marco abstracto de referencia al cual no podían adscribirse propiedades físicas. En su *Science and Hypothesis* de 1902, Poincaré declaraba que la cuestión del éter era metafísica, simplemente una hipótesis cómoda que algún día se rechazaría como inútil. En su comunicado al congreso de San Luis en 1904, examinó críticamente la idea de movimiento absoluto, postuló que el tiempo lócal de Lorentz (t') no era menos irreal que su tiempo general (t) y formuló lo que denominó el principio de relatividad, es decir, la imposibilidad de detectar el movimiento uniforme absoluto. Vale la pena citar su formulación de 1904: «De acuerdo al Principio de la Relatividad, las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para un observador "fijo" que para un observador que tiene un movimiento de traslación uniforme con respecto a él [...] debe obtenerse un tipo de dinámica totalmente diferente, que se caracterizará por encima de todo por la regla

de que ninguna velocidad puede sobrepasar la velocidad de la luz» (Sopka y Moyer 1986, p. 293). Hasta este punto, la intervención de Poincaré en la discusión había sido programática y semifilosófica. En el verano de 1905, sin conocer el inminente artículo de Einstein, desarrolló una teoría electrodinámica que en muchos aspectos iba más allá de la de Lorentz. Por ejemplo, comprobó la ley relativista de suma de velocidades, cosa que Lorentz no había hecho, y también proporcionó la fórmula de transformación correcta para la densidad de carga. Además de reformular el principio de la relatividad como «una ley general de la naturaleza», Poincaré modificó el análisis de Lorentz y probó que las transformaciones de Lorentz forman un grupo con la importante propiedad de que la magnitud $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ es invariante, es decir, permanece igual en cualquier marco de referencia. Incluso se dio cuenta de que el invariante se podía escribir en la forma simétrica $x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2$ si se introducía la coordenada para el tiempo imaginario $\tau = ict$. La teoría de Poincaré fue una importante mejora, una teoría de la relatividad, de hecho, pero no *la* teoría de la relatividad. De manera extraña, el matemático francés no prosiguió con sus importantes pesquisas ni mostró ningún interés en la teoría de la relatividad de Einstein desarrollada simultáneamente por éste.

La relatividad de Einstein

Cuando Albert Einstein, con 26 años, construyó la teoría especial de la relatividad en junio de 1905, era un desconocido en la comunidad física. El artículo que envió a *Annalen der Physik* era notable en muchos aspectos, aparte por supuesto de su estatus posterior como trabajo que revolucionó la física: por ejemplo, no incluía una sola referencia y por lo tanto oscurecía las fuentes de la teoría, un asunto que ha sido investigado por historiadores de la ciencia posteriores. Einstein no estaba familiarizado con la literatura y llegó a su teoría de manera absolutamente independiente. Conocía algo de los trabajos no técnicos de Poincaré y del trabajo de Lorentz de 1895, pero nada de la derivación de Lorentz (o de Larmor) de las ecuaciones de transformación. Otro aspecto sorprendente del artículo de Einstein es que no hacía mención del experimento de Michelson-Morley ni tampoco otros experimentos ópticos que no consiguieron detectar un viento de éter y que se discutían rutinariamente en la literatura sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento. Existen, sin embargo, evidencias convincentes no sólo de que Einstein tenía constancia del experimento de Michelson-Morley cuando escribió su artículo, sino de que el experimento no tenía especial importancia para él. No desarrolló su teoría con el objeto de explicar un enigma experimental, sino que trabajó a partir de consideraciones mucho más generales de simplicidad y simetría. Éstas estaban principalmente relacionadas con su profundo interés en la teoría de Maxwell y su creencia de que no debería haber diferencia en principio entre las leyes de la mecánica y las que gobiernan los fenómenos electromagnéticos. En la ruta de Einstein hacia la relatividad, los experimentos mentales eran más importantes que los reales.

Lo que era menos usual por aquel entonces es que la crucial primera parte del artículo de Einstein era cinemática, no dinámica. Comenzaba con dos postulados, el pri-

mero, el principio de relatividad, formulado como «las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica serán válidas para todos los marcos de referencia para los cuales las ecuaciones de la mecánica son válidas»; el otro postulado era «que la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una cierta velocidad c que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor». En cuanto al éter, Einstein lo rechazaba rápidamente por superfluo. A partir de este cimiento axiomático, procedía hacia consideraciones sobre conceptos aparentemente elementales como longitud, tiempo, velocidad y simultaneidad. Su propósito era aclarar estos conceptos fundamentales; mediante argumentos muy sencillos, primero mostraba que la simultaneidad no se puede definir de manera absoluta sino que depende del estado de movimiento de los observadores. A continuación aplicaba esta observación para mostrar que no podían existir nociones consistentes de tiempo absoluto y longitud absoluta de un cuerpo. Las transformaciones (de Lorentz) entre un sistema estacionario y otro moviéndose uniformemente con respecto a él se derivaban de una manera puramente cinemática.

Al contrario que las fórmulas de Lorentz y Poincaré, las de Einstein se aplicaban a coordenadas espaciales y temporales reales y físicamente mensurables. Un sistema era tan real como el otro. A partir de las ecuaciones de transformación se seguía la fórmula para la suma de velocidades, la contracción de cuerpos en movimiento y la dilación temporal, es decir, que los intervalos temporales son relativos a la velocidad del observador. El tiempo transformado de Einstein era tan real como cualquier otro y era, en este sentido, muy distinto del tiempo local de Lorentz. La suma de dos velocidades u y v proporciona la velocidad final $V = (u + v)/(1 + uv/c^2)$ y, como Einstein notó, esto implica el resultado anti-intuitivo de que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de su fuente.

Los fundamentos de la teoría de la relatividad estaban contenidos en la parte cinemática y, más específicamente, en sus dos postulados. Sólo en la segunda parte justificaba Einstein el título de su artículo, «sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Derivó las fórmulas de transformación para campos eléctricos y magnéticos, que, de acuerdo con Einstein, eran cantidades relativas del mismo modo que las coordenadas espaciales y temporales; pero aunque las cantidades de los campos eran relativas al estado de movimiento, la ley que las gobernaba no lo era: Einstein demostró que las ecuaciones de Maxwell-Lorentz tienen la misma forma en cualquier marco de referencia. Son invariantes relativamente. De acuerdo con la teoría de Einstein, muchas cantidades físicas son relativas al movimiento del observador, pero otras cantidades (como la carga eléctrica y la velocidad de la luz) y las leyes básicas de la física permanecen iguales, y son estos invariantes los que son fundamentales. Por esta razón, Einstein al principio habría preferido llamar a su teoría «la teoría de invariantes», un nombre que hubiera impedido muchos malentendidos. El nombre de «teoría de la relatividad» fue introducido por Planck en 1906 y aceptado rápidamente. Irónicamente, Planck consideraba que la esencia de la teoría de Einstein era sus rasgos absolutos, no los relativos.

En 1892 Lorentz había postulado la fuerza que actúa sobre una carga q que se mueve en un campo magnético (la fuerza de Lorentz, $F = qv \times B/c$). Einstein mantuvo la

ley pero cambió su estatus. Fue capaz de deducirla de una manera sencilla a partir de sus transformaciones y reducirla así a una ley derivada. Al final de su artículo, Einstein consideraba la masa y energía de cargas eléctricas en movimiento, electrones. Sus electrones diferían de los que se investigaban en electrodinámica contemporánea, ya que para Einstein eran cantidades primitivas; no estaba interesado en cuestiones de su forma o estructura interna. Predijo que la energía cinética de un electrón variaría con su velocidad como $m_0c^2\ (\gamma - 1)$, donde m_0 es la masa de un electrón que se mueve lentamente, su masa en reposo. Desde este resultado, sólo hay un pequeño paso hasta la equivalencia entre masa y energía, un paso que Einstein dio en otro artículo de 1905. Allí derivó la que es, posiblemente, la ley física más famosa, $E = mc^2$. En palabras de Einstein, «la masa de un cuerpo es una medida de su contenido energético; si la energía cambia en L, la masa cambia de la misma manera en $L/9 \times 10^{20}$, medida la energía en ergios y la masa en gramos».

La mayoría de los lectores del artículo de Einstein probablemente lo consideraron una contribución a la teoría electrónica tan de moda por aquel entonces y prestaron menos atención a su parte cinemática. Pero Einstein no era un teórico electrónico y su teoría era, de acuerdo con los postulados sobre los cuales se construía, totalmente general. Se mantenía que los resultados eran válidos para todo tipo de materia, eléctrica o no. Einstein indicaba su distancia de la teoría electrónica contemporánea al escribir que sus resultados, aunque se derivaran de la teoría de Maxwell-Lorentz, eran «también válidos para puntos materiales ponderables, ya que un punto material ponderable también puede convertirse en un electrón (en nuestro significado de la palabra) mediante la adición de una carga eléctrica, *sin importar cuán pequeña*» (Miller 1981, p. 330; cursiva en el original). Este tipo de «electrón» no tenía lugar dentro de la visión del mundo electromagnética. La equivalencia entre masa y energía era bien conocida en 1905, pero en una interpretación electromagnética más limitada (véase capítulo 8). La expresión de Einstein, $E = mc^2$, era completamente general.

La teoría de Einstein fue asumida y debatida con bastante rapidez, especialmente en Alemania. Su verdadera naturaleza no se reconoció inmediatamente, sin embargo, y muchas veces se supuso que era una versión mejorada de la teoría electrónica de Lorentz. Se utilizaba comúnmente el nombre de «teoría de Lorentz-Einstein», que se puede encontrar en la literatura hasta los años veinte. El más importante de los primeros defensores de la relatividad fue Max Planck, que fue crucial no sólo por poner su autoridad tras la teoría, sino por desarrollarla técnicamente. Planck estaba muy impresionado por la estructura lógica de la teoría y sus características unificadoras. La reconocía como una teoría fundamental que abarcaba tanto mecánica como electromagnetismo y le fue grato cuando descubrió, en 1906, que la teoría de la relatividad se podía presentar en un principio de mínima acción. Planck también desarrolló la dinámica de las partículas de acuerdo con la teoría de Einstein y fue el primero en escribir las leyes de transformación para la energía y el momento. Otro importante defensor de la teoría era el matemático de Gotinga Hermann Minkowski quien, en un seminario en 1907, presentó la teoría de la relatividad en un marco geométrico tetradimensional con un

fuerte atractivo metafísico. Minkowski introdujo la noción de la línea del mundo de una partícula y explicó con entusiasmo la ruptura radical con el pasado que suponía la teoría de la relatividad: «De aquí en adelante el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo un tipo de unión de los dos conservará una realidad independiente» (Galison 1979, p. 97). Sin embargo, Mikowski consideraba que la teoría de Einstein completaba la de Lorentz y la interpretaba, de manera errónea, como si estuviera dentro del marco de la cosmovisión electromagnética.

Gracias a los trabajos de Planck, Minkowski, Ehrenfest, Laue y otros, en 1910 la teoría de la relatividad de Einstein había obtenido un firme apoyo y era aceptada probablemente por una mayoría de los físicos teóricos de elite. *Annalen der Physik* se convirtió en la principal revista para un creciente número de artículos en los que se ponía a prueba la teoría, se la examinaba conceptual y técnicamente, se aplicaba a nuevas áreas, y se reformulaba la vieja física dentro del marco relativista. Fuera de Alemania la recepción fue más lenta y más dubitativa, pero tanto si se aceptaba la teoría en un sentido físico como si no, en 1910 muchos físicos utilizaban sus ecuaciones. Por aquel entonces, la teoría era poco conocida fuera de la comunidad física. Llevó algún tiempo que la relatividad se difundiera hasta el físico medio y, naturalmente, aún más para que llegara a los libros de texto de física. La creciente familiaridad de la teoría especial de la relatividad queda ilustrada en el famoso *Atombau und Spektrallinien* de Sommerfeld, que era un libro de física atómica dirigido sobre todo a estudiantes y no a expertos. En las primeras tres ediciones, de 1919 a 1922, Sommerfeld comenzaba su capítulo sobre la teoría de la estructura fina con una introducción de dieciocho páginas a la teoría de la relatividad. En la edición de 1924, reemplazó la introducción con el optimista comentario de que la teoría de la relatividad era ahora un conocimiento común a todos los científicos.

De la relatividad especial a la general

> Mi primer pensamiento acerca de la teoría general de la relatividad fue concebido dos años después, en 1907. La idea se me ocurrió de repente [...] me di cuenta de que todas las leyes naturales excepto la ley de la gravedad se podían discutir dentro del marco de la teoría especial de la relatividad. Quería encontrar la razón de esto, pero no me resultó fácil conseguir este objetivo [...] El avance fundamental vino de repente un día. Estaba sentado en una silla en mi oficina de patentes en Berna. De repente, me fulminó un pensamiento: si un hombre cae libremente, no sentiría su peso. Me quedé sobrecogido. Este sencillo experimento mental me causó gran impresión. Esto me condujo a la teoría de la gravedad (Einstein 1982, p. 47).

Así era como Einstein, en una comunicación de 1922, describía el principio de la ruta que le conduciría a una de las teorías más fundamentales que jamás ha conocido la historia de la ciencia. A pesar de contribuciones técnicas interesantes de David Hil-

bert, Gunnar Nordström y algunos más, la relatividad general fue sobre todo un trabajo de Einstein. De acuerdo al principio de equivalencia, ningún experimento mecánico puede distinguir entre un campo gravitatorio constante (no acelerado) y homogéneo y un marco de referencia uniformemente acelerado en el cual no hay fuerza gravitatoria. En 1907 Einstein formuló este principio de una manera generalizada, que sería válida para todo tipo de experimentos, mecánicos o no. Desde este punto de vista, no hay diferencia esencial entre inercia y gravitación. Einstein no continuó inmediatamente con esta idea, pero en 1911 produjo una primera versión de un nuevo programa de investigación que consistía en encontrar una nueva teoría de la gravitación que condujera tanto al principio de equivalencia como a una teoría extendida de la relatividad. Esta primera generalización del principio de la relatividad proporcionaba dos notables predicciones: en primer lugar, que la gravedad afectaba a la propagación de la luz y, en segundo, tal y como Einstein ya había observado en su artículo de 1907, que el ritmo de un reloj se frena cerca de una masa gravitatoria grande. En cuanto a la primera predicción, Einstein halló que para un rayo que pasara tangente al disco solar, la deflexión sería algo menor que un segundo de arco, 0,83". El reloj en la segunda predicción podría ser un átomo que emitiera luz, midiéndose mediante una línea espectral monocromática, y en este caso Einstein calculó que la longitud de onda recibida se incrementaría (avanzaría hacia el rojo) con el campo gravitatorio. El resultado, consecuencia directa del principio de equivalencia, era $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\phi/c^2$, siendo $\Delta\phi$ la diferencia entre los potenciales gravitacionales donde la luz se emite y donde se recibe.

Einstein se dio cuenta de que su teoría de 1911 era tan sólo un paso hacia la teoría que buscaba. Durante los siguientes cuatro años se sumergió totalmente en la búsqueda aún más compleja de la nueva teoría relativista de la gravitación. La clave del problema resultó estar en las matemáticas. «En toda mi vida no he trabajado ni la mitad de duro», escribía a Sommerfeld en 1912; «He adquirido un gran respeto por las matemáticas, cuya parte más sutil yo había considerado, en mi simpleza, como un puro lujo hasta ahora» (Pais 1982, p. 216). Ayudado por su amigo, el matemático Marcell Grossmann, reconoció que el instrumento matemático apropiado para la teoría era el cálculo diferencial absoluto (o análisis tensorial), que se originaba con los trabajos del siglo XIX de Gauss y Riemann. En colaboración con Grossmann, Einstein desarrolló una teoría tensorial de la gravitación en la cual el espacio-tiempo no se veía ya como un inerte fondo de los elementos físicos, sino que estaba él mismo sujeto a cambios debidos a la presencia de cuerpos gravitatorios. Ahora abandonó totalmente el elemento de línea de la relatividad especial y lo reemplazó con una expresión tensorial más compleja que en general consistía en diez términos cuadráticos: $ds^2 = \Sigma g_{mn} dx^m dx^n$. De manera similar, ya no basaba su teoría en las transformaciones de Lorentz, las cuales quería reemplazar con un grupo de invariancia más general. En 1913, Einstein discutió los requisitos de covariancia general, es decir, que las ecuaciones de campo deben tener la misma forma en todo marco de referencia. Consideraba que las leyes físicas que satisficieran este requisito serían preferibles, ya que esto minimizaría la arbitrariedad y maximizaría la simplicidad de la cosmovisión. Sin embargo, tras formular el principio de

covariancia general, lo abandonaba y en vez de eso proponía un conjunto de ecuaciones de campo que no poseían esta propiedad. La principal razón de Einstein para este paso retrógrado era que sus ecuaciones con covariancia general no se reducían al límite newtoniano para campos gravitatorios estáticos débiles. Desarrolló un argumento, que sería más tarde conocido como «el argumento del agujero», que le convenció de que una teoría basada en ecuaciones con covariancia general no podía proporcionar la respuesta correcta. La razón era que una teoría tal, pensaba erróneamente Einstein, infringiría el determinismo y la causalidad. Hicieron falta dos años de profundo pensamiento antes de que se viera forzado a reconocer que la covariancia general era en efecto la clave de todos sus problemas. Esta fase culminó durante el verano y otoño de 1915 y en noviembre de ese mismo año presentó ante la Academia de Ciencias de Berlín la forma final de sus ecuaciones de campo generalmente covariantes para la gravitación; era, escribió a Sommerfeld, «el más valioso descubrimiento que he hecho en mi vida».

El artículo de Einstein del 18 de noviembre de 1915 no sólo incluía un nuevo grupo de ecuaciones de campo gravitatorio que eran generalmente covariantes y lógicamente satisfactorias, sino que también utilizaba su nueva teoría para concluir que su anterior predicción para la deflexión gravitatoria de la luz estaba equivocado en un factor de 2. De acuerdo con la teoría mejorada, un rayo de luz que pasara cerca del sol sufriría una deflexión con un ángulo de 1,7". A parte de la atractiva estructura lógica de la teoría, fue otra predicción la que realmente hizo que Einstein sintiera que su teoría era correcta, y esta vez se trata de la predicción de un efecto conocido: la precesión anómala del perihelio de Mercurio. Se sabía desde 1859 que Mercurio no se mueve alrededor del sol exactamente como debería de acuerdo a la mecánica newtoniana. Su perihelio precede lentamente alrededor del sol, como explica la mecánica celeste, pero con una velocidad de rotación ligeramente distinta. La anomalía era de sólo 43" por siglo (un 8 por 100 de la precesión observada), pero era suficiente para constituir un problema para la teoría de la gravitación de Newton. Einstein no fue el primero que buscó explicar la anomalía de Mercurio, pero fue el primero en proporcionar una explicación cuantitativa basada en una teoría fundamental que no se había construido ex profeso para resolver el problema. Su valor calculado para la precesión estaba casi perfectamente de acuerdo con el observado. Einstein sabía desde hacía tiempo que el problema del perihelio de Mercurio sería una prueba ineludible para cualquier nueva teoría de la gravitación. Ya el día de Navidad de 1907 escribió a su amigo Conrad Habicht: «Espero aclarar los cambios seculares de la longitud de perihelio de Mercurio, hasta ahora inexplicados [...] [pero] de momento no parece funcionar».

A principios de 1916, mientras Europa se desangraba en la Primera Guerra Mundial, Einstein preparaba su teoría general de la relatividad. Pocos físicos fueron capaces de entender (o ni siquiera tener acceso a) la teoría dada su complejidad y formulación matemática poco familiar, pero la teoría proporcionaba tres predicciones, las cuales podían medirse para juzgar si la teoría era en verdad físicamente correcta y no simplemente el sueño de un matemático imaginativo. La predicción del avance del perihelio de Mercurio fue un gran éxito, pero estaba lejos de ser suficiente como para convencer

a los escépticos de la verdad de la teoría de Einstein. Después de todo, Einstein sabía de la anomalía desde hacía tiempo, así que quizás había incorporado el resultado de alguna manera dentro de su teoría. ¿Y no podía el resultado correcto obtenerse sin la ayuda de la dudosa teoría de la relatividad? Esto era lo que unos pocos antirrelativistas alemanes mantenían, refiriéndose a una teoría que Paul Gerber había publicado en 1902 en la cual había obtenido la misma expresión para el avance del perihelio de un planeta que la de Einstein en 1915. Ernst Gehrcke, uno de los principales antirrelativistas alemanes, hizo que se volviera a publicar el artículo en 1917 para utilizarlo contra la teoría de la relatividad y la prioridad de Einstein. El resultado fue una controversia menor, pero pocos físicos, incluso entre los antirrelativistas, fueron llevados a engaño. La teoría de Gerber era simplemente errónea y su expresión correcta para el perihelio puramente una coincidencia.

El corrimiento al rojo gravitatorio, el mismo en 1915 que en 1911, era extremadamente difícil de medir, sobre todo porque las líneas espectrales medidas provenían de la caliente atmósfera solar, donde un corrimiento al rojo no podía ser distinguido fácilmente de otros efectos como el Doppler. Entre 1915 y 1919, varios investigadores trataron de verificar el «efecto Einstein», pero en todos los casos fracasaron a la hora de encontrar un efecto de la magnitud predicha por Einstein. Por otro lado, en 1920 dos físicos de la Universidad de Bonn, Albert Bachem y Leonhard Grebe, publicaron resultados que estaban esencialmente de acuerdo con la predicción. No es sorprendente que Einstein apoyara rápidamente los resultados de Bachem-Grebe. Aunque la afirmación alemana fuera criticada por otros experimentales y todo el asunto no fuera aclarado hasta mucho más tarde, a partir de 1920 aproximadamente, muchos físicos llegaron a la conclusión de que la predicción de Einstein estaba razonablemente de acuerdo con las observaciones, o, al menos, que no había un desacuerdo claro. Por ejemplo, el astrónomo americano Charles E. St. John del Observatorio Solar de Mount Wilson creía, entre 1917 a 1922, que sus cuidadosas observaciones se desviaban de la teoría de Einstein, pero en 1923 se «convirtió» a la relatividad y decidió que había confirmado la predicción de Einstein. Hay motivos para suponer que el cambio de actitud de St. John, como el de muchos otros investigadores, era en gran parte el resultado de una tercera prueba, las medidas del eclipse de 1919 que tan espectacularmente confirmara la predicción sobre la deflexión de la luz.

Poco después de la primera (e incorrecta) predicción de 1911, unos pocos astrónomos intentaron comprobar la predicción midiendo la posición de las estrellas cerca del borde solar durante un eclipse. Las expediciones al eclipse de 1912 en Brasil y de 1914 en el sur de Rusia no produjeron resultado alguno, en el primer caso por la persistente lluvia y en segundo por el estallido de la guerra. En 1918 astrónomos americanos del Observatorio Lick consiguieron tomar fotografías del eclipse que atravesó los Estados Unidos. El informe, que incluye datos en conflicto con la predicción de 1915, en todo caso no fue publicado. En vez de eso, fue la expedición británica dirigida por Frank Dyson y Arthur Eddington y planeada en 1917 la que produjo los resultados positivos. El eclipse solar total de 1919 fue estudiado en dos lugares, en la Isla Príncipe frente a la

costa de África occidental (por Dyson) y en Sobral en Brasil (por Eddington). Se tomaron fotografías en las dos expediciones; cuando se analizaron, mostraron una deflexión de la luz en excelente (aunque no perfecto) acuerdo con la teoría de Einstein. Dyson, que informó de los resultados en un encuentro conjunto de la Royal Society y la Royal Astronomical Society el 6 de noviembre de 1919, concluía: «Se ha obtenido un resultado muy claro de que la luz es deflectada de acuerdo con la ley de gravitación de Einstein» (Earman y Glymour 1980a, p. 77). Ésta era, de hecho, una conclusión demasiado optimista, que podía obtenerse sólo mediante un tratamiento de los datos disponibles que rayaba en la manipulación, incluyendo el rechazo de datos que no estaban de acuerdo con la predicción de Einstein. Eddington, la autoridad británica sobre la relatividad y profeta de ésta, estaba totalmente convencido de la verdad de la teoría general de la relatividad y su visión preconcebida nubló la conclusión. En cualquier caso, la teoría fue aceptada por la mayoría de los físicos y astrónomos, aunque no por todos. Al igual que Gehrcke, había invocado la antigua teoría de Gerber como una alternativa a los cálculos de Einstein para el perihelio de Mercurio, conservadores como Wiechert y Larmor sugirieron elaboradas explicaciones electromagnéticas de deflexión de la luz al principio de los años veinte. Pero comparados con el enorme interés en la teoría de Einstein, éstos y otros intentos no relativistas atrajeron poca atención. La expedición al eclipse de 1919 se convirtió en un punto crucial en la historia de la relatividad, aunque fuera desde un punto de vista social más que científico.

De acuerdo con las memorias de Ilse Rosenthal-Schneider, que era una estudiante de filosofía y física en la Universidad de Berlín en 1919, cuando Einstein recibió la noticia de la confirmación de Dyson-Eddington, se quedó «bastante impertérrito». Le dijo a ella, «sabía que la teoría es correcta. ¿Es que tú lo dudabas?». A la pregunta de Rosenthal-Schneider de qué habría dicho si las observaciones hubieran estado en desacuerdo con la teoría, Einstein respondió, «Tendría que haber compadecido a nuestro pobre Dios. La teoría es correcta en todo caso» (Rosenthal-Schneider 1980, p. 74).

La imagen de Einstein de un racionalista omnisciente y algo arrogante a quien no le importaban los experimentos está sin duda muy extendida y es parte del mito de Einstein. Pero es básicamente incorrecta, al menos en lo que se refiere al joven Einstein. Por el contrario, Einstein estaba profundamente interesado en las pruebas experimentales de sus teorías y trataba muchas veces de organizar estas pruebas. Por ejemplo, cuando Einstein predijo en 1911 que la luz sería deflectada en campos gravitacionales, fue él quien intentó interesar a los astrónomos para que comprobaran la predicción. Einstein enfatizó la estructura cerrada y lógica de su teoría general de la relatividad, que para él implicaba no tanto que debía ser, por tanto, correcta, sino que no podía ser modificada para acomodar alguna refutación experimental. En una carta a Eddington de 1919 escribía, «estoy convencido de que el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales es una consecuencia de la teoría de la relatividad absolutamente inevitable. Si se probara que este efecto no existe en la naturaleza, se tendría que abandonar toda la teoría» (Hentschel 1992, p. 600). Se expresó de manera similar en lo tocante a la predicción sobre la deflexión de los rayos de luz; lejos de quedarse «impertérrito», expre-

só gran alegría cuando le llegaron noticias de los resultados. La historia de Rosenthal-Schneider no es de confianza. El hecho de que más tarde Einstein llegara a adoptar una actitud platónica y racionalista acerca de los experimentos frente a las teorías matemáticas es otro asunto.

Recepción

La teoría de la relatividad de Einstein tenía en común con la biología evolutiva de Darwin, los rayos invisibles de Röntgen y el psicoanálisis de Freud el hecho de que fue recibida con un enorme interés fuera, además de dentro, de la comunidad científica. Se convirtió en uno de los símbolos del modernismo del periodo de entreguerras y, como tal, su importancia se extendió mucho más allá de la física. La teoría de Einstein fue catalogada de «revolucionaria», un término comúnmente asociado al paso de la física newtoniana a la de Einstein. La teoría de la relatividad era de hecho una especie de revolución conceptual y, a principios de los años veinte, la metáfora revolucionaria, asociada libremente con revoluciones políticas, se convirtió en un emblema de la teoría de Einstein. Era un estigma que desagradaba a Einstein. Einstein no se consideraba un revolucionario; en sus artículos y comunicaciones, enfatizó repetidamente la naturaleza evolutiva del desarrollo de la ciencia. La teoría de la relatividad, decía muy a menudo, era el resultado natural de los fundamentos de la física trazados por Newton y Maxwell. Así, en un artículo de 1921, Einstein hacía notar, «hay algo atractivo en presentar la evolución de una secuencia de ideas de la forma más breve posible, y todavía de una manera suficientemente completa para conservar en todo momento la continuidad del desarrollo. Intentaremos lograr esto para la teoría de la relatividad, y mostrar que toda la ascensión se compone de pequeños y casi autoevidentes pasos del pensamiento» (Hentschel 1990, p. 107).

El público general –incluyendo a muchos científicos y a la mayoría de los filósofos– descubrió la teoría de la relatividad tan sólo tras el fin de la Primera Guerra Mundial, en parte como resultado de la muy publicitada expedición del eclipse, que anunció la confirmación de la teoría de Einstein. Una gran parte de la literatura sobre relatividad en los años veinte estaba escrita por no científicos que, en la mayoría de los casos, no entendían en absoluto la teoría y discutían sus implicaciones en áreas donde no se podía aplicar con legitimidad. Algunos autores «aplicaban» la relatividad a la teoría del arte, algunos a teorías psicológicas y otros establecían amplias consecuencias filosóficas y éticas a partir de la teoría de Einstein. No era poco común que se sostuviera que el relativismo ético se seguía de la teoría de la relatividad y que por esta razón se declaraba *non grata* en ciertos círculos. ¿No había afirmado Einstein que todo es relativo y que ningún punto de vista es superior a ningún otro?

El eminente filósofo español José Ortega y Gasset fue uno de los que utilizaron mal la teoría de Einstein para discutir a favor de su filosofía particular, a la cual denominaba «perspectivismo»; he aquí una muestra: «La teoría de Einstein es una maravillosa prueba de la armoniosa multiplicidad de todos los puntos de vista posibles. Si la idea se extiende a la moral y a la estética, llegaremos a experimentar la Historia y la vida de

un nuevo modo [...] En vez de considerar bárbaras a las culturas no europeas, empezaremos a respetarlas como métodos de enfrentarse al cosmos que son equivalentes a los nuestros. Hay una perspectiva china que está justificada tanto como la occidental» (Williams 1968, p. 152). Por cierto, el perspectivismo de Ortega y Gasset sería aceptado más adelante por muchos occidentales como políticamente correcto y utilizado para criticar la cosmovisión científica. Sean cuales sean los méritos del perspectivismo o del relativismo, estas ideas no tienen nada que ver con la teoría de la relatividad.

El gráfico 7.1 muestra la distribución anual de libros alemanes sobre relatividad entre 1908 y 1944, con un pico agudo en 1921, cuando el debate público alcanzó su cima. El gráfico se refiere tanto a libros de texto de física como a libros y panfletos populares, filosóficos y antirrelativistas; esta última categoría representaba aproximadamente tres cuartas partes del número total de títulos publicados durante los años del pico, 1920-1922. Por supuesto, los físicos habían «descubierto» la relatividad muchos años antes de 1921, en la forma de la teoría especial, aunque, como se ha mencionado, hasta 1913 aproximadamente muchos físicos no distinguían claramente entre relatividad einsteniana y las ecuaciones de las teorías electrónicas. La estructura fina de las primeras publicaciones sobre relatividad se muestra en el gráfico 7.2, que curiosamente comienza en 1900. Es de notar el dominio alemán, la falta de literatura francesa hasta 1912 aproximadamente y la caída en el número total de publicaciones entre 1910 y 1915 (véase también la tabla 7.1). Esta última característica probablemente refleja que, en 1911, la teoría especial de la relatividad era ampliamente aceptada entre los físicos y no se consideraba que estuviera en la vanguardia de la física. Fue sólo tras la aparición de la teoría extendida en 1915 cuando se recuperó el impulso.

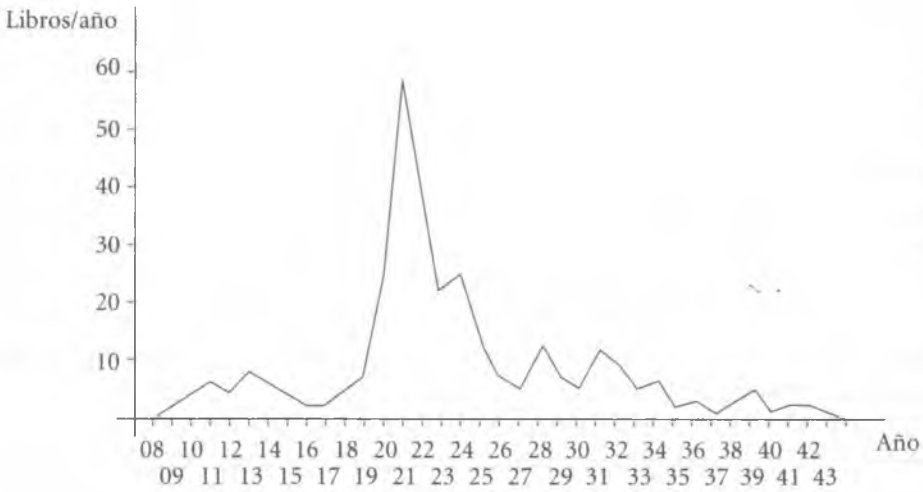


Gráfico 7.1. Libros alemanes sobre relatividad, 1908-1943. *Fuente*: Goenner 1992. Reelaborado con el permiso de Einstein Studies, editores de serie Don Howard y John Stachel.

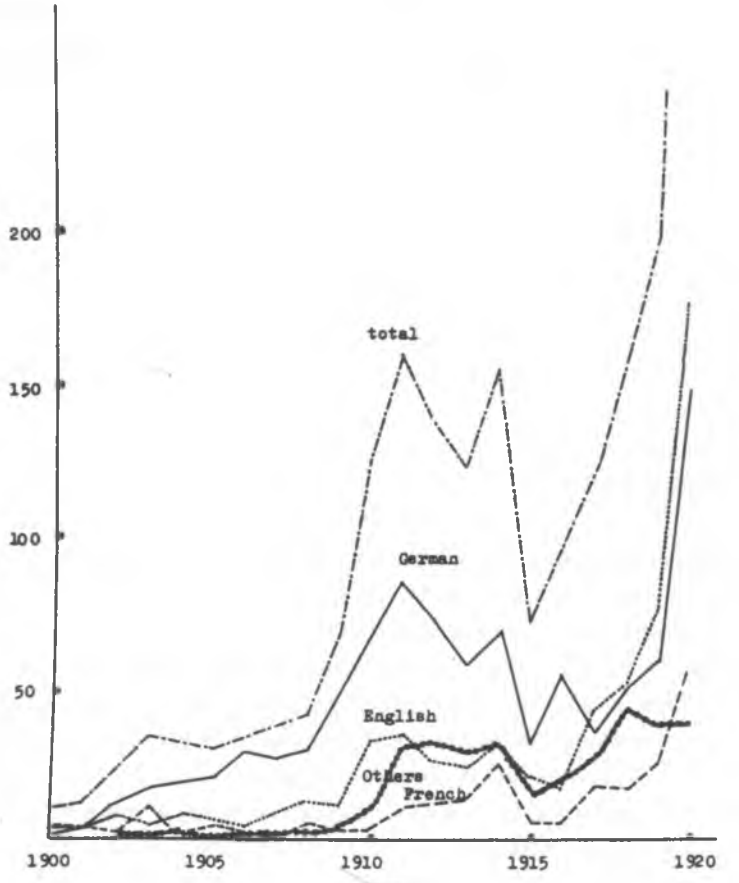


Gráfico 7.2. Distribución de publicaciones sobre la relatividad, 1900-1920. *Fuente:* Reimpreso de J. Illy, «Revolutions in a Revolution», *Studies in the History and Philosophy of Science* 12, 1981, pp. 173-210, con permiso de Elsevier Science.

Las recepciones de la relatividad dependían de los entornos particulares nacionales y culturales. En Francia, la teoría de Einstein fue recibida al principio con silencio, un hecho sin duda relacionado con el sistema de educación e investigación francés, rígido y centralizado y, posiblemente, con la influencia de Poincaré. Salvo por Paul Langevin y unos pocos de sus estudiantes, los físicos franceses descubrieron la relatividad sólo cuando la observación del eclipse de 1919 llegó a los titulares internacionales. Incluso entonces, la relatividad se recibió generalmente con ciertas sospechas; durante los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, no se dejó de tener la sensación de que la relatividad era una teoría alemana.

La situación en los Estados Unidos no era muy diferente, aunque por distintos motivos. Es significativo que el primer estudio serio fuera un artículo de 1909 escrito por dos químicos-físicos, Gilbert N. Lewis y Richard C. Tolman. Éstos, como casi todos los

TABLA 7.1
Distribuciones nacionales de publicaciones científicas sobre la relatividad hasta 1924

País	*Nº de autores*	*Nº de publicaciones*
Alemania	350	1.435
Inglaterra	185	1.150
Francia	150	690
Estados Unidos	128	–
Italia	65	215
Países Bajos	50	126
Austria (-Hungría)	49	–
Suiza	37	–
Rusia (URSS)	29	38

Nota: Datos de Hentschel 1990, p. 67.

otros científicos estadounidenses que tenían constancia de la teoría de la relatividad, tendían a presentar la teoría de acuerdo con las normas positivistas. Para ellos, la teoría de la relatividad era una generalización inductiva a partir de datos experimentales, una actitud muy distinta de la que Einstein y sus colegas alemanes mantenían. El punto de vista de Millikan, que «la teoría especial de la relatividad se puede describir como si empezara esencialmente con una generalización del experimento de Michelson», era compartida por casi todos los físicos norteamericanos (Holton 1988, p. 280). En los Estados Unidos, en particular, era común criticar la teoría de Einstein por ser «antidemocrática» y estar contra el sentido común popular. William Magie, un profesor de física de la Universidad de Princeton, era un portavoz de este tipo de oposición cuasipolítica. En un comunicado de 1912, argumentaba que las teorías físicas fundamentales «deben ser inteligibles para todo el mundo, tanto para el hombre común como para el académico formado». Manteniendo, de manera algo poco realista, que «todas las teorías físicas anteriores han sido así de inteligibles», Magie sugería que los principios democráticos de la ciencia se asentaban en «los conceptos primarios de fuerza, espacio y tiempo, tal como son entendidos por toda la raza humana», pero la teoría de Einstein no se apoyaba en estos conceptos naturales, lo cual llevaba a que Magie preguntara, retóricamente, «¿acaso no tenemos el derecho de pedir de estos líderes del pensamiento, a quienes debemos el desarrollo de la teoría de la relatividad, que [...] prosigan su brillante trayectoria hasta que consigan explicar el principio de relatividad reduciéndolo a un modo de acción que esté expresado en términos de los conceptos primarios de la física?» (Hentschel 1990, p. 75).

La relatividad llegó a Rusia un poco antes que a los Estados Unidos y el tema fue discutido en el seminario teórico de Paul Ehrenfest en San Petersburgo a partir de 1907, aproximadamente. Poco después de la guerra civil, cuando Rusia se convirtió en la Unión Soviética, se ofrecieron cursos sobre la teoría extendida de la relatividad en

San Petersburgo, donde Alexander Friedmann estableció una importante escuela de física teórica e hizo contribuciones fundamentales a la cosmología relativista. Al contrario de la situación en los años treinta y cuarenta, la relatividad no se contemplaba como una teoría controvertida ideológicamente; aunque algunos defensores de la fe marxista ortodoxa rechazaban la teoría de la relatividad en nombre del materialismo dialéctico, las objeciones filosóficas y políticas no interfirieron en el estudio científico de la relatividad que tuvo lugar en San Petersburgo (o, a partir de 1924, Leningrado) y en otros lugares del amplio imperio comunista (véase también el capítulo 16).

La teoría de la relatividad era, sobre todo, una teoría alemana y quizá, como algunos han argumentado, una teoría judeoalemana. En comparación con las animadas discusiones en Alemania y las importantes contribuciones de este país, los físicos británicos tardaron en responder constructivamente a la nueva teoría. Parte del problema fue el rechazo de Einstein del éter, un concepto al cual se adherían la mayoría de los físicos británicos y que les costaba abandonar. El primer libro de texto sobre la relatividad escrito por un británico fue *The Principle of Relativity* de Ebenezer Cunningham, publicado en 1914. Este libro, con el cual el joven Paul Dirac aprendió relatividad, todavía incluye vestigios de la cosmovisión etérea. Por ejemplo, el principio de la relatividad se formula como «la hipótesis general, sugerida por la experiencia, de que sea cual sea la naturaleza del medio etéreo no podemos obtener una estimación de las velocidades de los cuerpos relativas a él mediante ningún experimento concebible» (Sánchez-Ron 1987, p. 52). En Inglaterra, igual que en todas partes, la relatividad realmente triunfó sólo después de 1919, ahora con Eddington como abanderado de la teoría. Aparecieron varios monográficos sobre teoría de la relatividad en 1920-1923, de los cuales *Space, Time and Gravitation* (1920) y *The Mathematical Theory of Relativity* (1923) se convirtieron en grandes ventas internacionales. El rápido crecimiento del interés en la relatividad puede haber reflejado, de alguna manera, la situación cultural general después de la Gran Guerra. Esto es lo que Dirac recordaba:

> Es fácil ver la razón de este tremendo impacto. Acabamos de experimentar una terrible y muy seria guerra [...] todo el mundo quería olvidarla. Y entonces apareció la relatividad como una maravillosa idea que conducía a un nuevo territorio del pensamiento. Era un escape de la guerra [...] la relatividad era un tema sobre el cual todo el mundo se sentía con la competencia para escribir de manera general y filosófica. Los filósofos sólo destacaron el punto de vista según el cual todo tenía que ser considerado relativo a otra cosa, y más bien afirmaban que ellos habían sabido de relatividad siempre. (Kragh 1990, p. 5).

Los recuerdos de Dirac en 1977 se ven apoyados por fuentes primarias, como un editorial del periódico británico The Morning Post del 27 de septiembre de 1922, que ofrece otra explicación posible: «Uno de los resultados de la guerra, en la cual se movilizaron con tan buen propósito los cerebros científicos de este país, es un apreciable incremento del interés público en los logros de la ciencia, sean teóricos o prácticos. En

los días previos a la guerra, ni el hombre de la calle ni el hombre en la ventana del club social podría haber sido persuadido para leer artículos sobre la controversia de Einstein contra Newton» (Sánchez-Ron 1992, p. 58).

Pero fue en la Europa germanoparlante donde realmente pasaron cosas. No sólo era éste el mundo de Einstein, sino también el mundo de Planck, Laue, Weyl, Hilbert, Minkowski, Mie, Born, Lorentz y Pauli. Un debate constructivo matemática y conceptualmente informado sólo tuvo lugar en Alemania; y también fue allí donde la destructiva discusión antirrelativista floreció primero y duró más. La teoría de la relatividad se veía atacada por un inconexo grupo de físicos alemanes de derechas que no sólo estaban políticamente en la extrema derecha, sino que también apoyaban virtudes científicas conservadoras, tales como el mecanicismo clásico, la causalidad, la predictibilidad y la inspiración física basada en experimentos más que en la teoría (véase también el capítulo 10). Los miembros más activos y radicales de la facción antirrelativista y también, a veces, anticuántica eran Philipp Lenard, Johannes Stark y Ernst Gehrcke, todos ellos físicos de renombre. Lenard y Stark eran premios Nobel, y Gehrcke, a partir de 1921 profesor ordinario del Physikalisch-Technische Reichsanstalt, era un reconocido experto en óptica experimental. Los físicos antirrelativistas rechazaban las teorías de Einstein, las cuales consideraban absurdas, espiritualmente peligrosas y carentes de confirmación experimental. Si se confirmaba alguna de las ecuaciones relativistas, argumentaban que las ecuaciones podían derivarse igual de bien a partir de un fundamento clásico. El espacio-tiempo tetradimensional, el espacio curvado y la paradoja de los gemelos estaban entre los conceptos que fueron declarados abstracciones matemáticas desprovistas de significado físico. Desde 1920, la cruzada alemana contra la relatividad se aceleró con un encuentro anti-Einstein en Berlín organizado por Paul Weyland, un activista político, y con Gehrcke como orador. El encuentro causó una contundente respuesta pública por parte de Einstein, en la que señalaba que el antisemitismo era parte de la agenda de la campaña antirrelativista. Durante algunos años más, Lenard, Stark, Gehrcke y sus aliados siguieron atacando a Einstein y a la teoría de la relatividad en un gran número de artículos, panfletos y libros. Según ellos, la relatividad no era una teoría científica en absoluto, sino una ideología, un astuto ilusionismo camuflado por Einstein y sus amigos con poder en la física alemana. Uno de los panfletos antirrelativistas de Gehrcke se titulaba, *La teoría de la relatividad: una ilusión de masas científica* (1920). Aunque ruidosos y bastante numerosos, los antirrelativistas no consiguieron impedir el progreso de la física teórica alemana en los años veinte y, en lugar de eso, se marginaron a sí mismos. Fue sólo después de 1933, cuando un nuevo sistema político había tomado el poder, cuando el antirrelativismo tomó alguna relevancia, aunque limitada, en la ciencia alemana.

CAPÍTULO 8

Una revolución fallida

En los capítulos anteriores hemos mencionado muchas veces la cosmovisión electromagnética como el principal competidor del punto de vista mecánico de la física. Puede parecer extraño que tratemos esta cosmovisión incorrecta después de haber descrito la llegada de la correcta teoría de la relatividad, ya que después de 1905 los físicos seguramente deberían haber reconocido que la teoría electrónica (en el sentido más amplio) era inferior a la de la relatividad. Puede que hubieran debido hacerlo, pero no lo hicieron. De hecho, la cosmovisión electromagnética experimentó su cenit justo después de 1905, e hicieron falta al menos cinco años más hasta que se reconociera que este formidable intento de formular una nueva base para la física era probablemente insostenible.

El concepto de masa electromagnética

Como se mencionó en el capítulo 1, en el cambio de siglo la cosmovisión mecánica estaba siendo atacada y de camino a ser reemplazada por una imagen basada en campos electromagnéticos. La versión más radical y elaborada de la nueva concepción, conocida como la cosmovisión electromagnética, emergió sobre 1900 y floreció durante una década aproximadamente. La esencia de su programa era la reducción total de la mecánica al electromagnetismo, una nueva física en la cual la materia habría desaparecido como sustancia y habría sido reemplazada por los efectos de los campos electromagnéticos: los electrones. El programa se basaba en desarrollos en electrodinámica de las décadas de 1880 y 1890, un periodo durante el cual emergió una imagen de la naturaleza electromagnética menos completa, que produjo las teorías electrónicas de Larmor, Lorentz y Wiechert. En este proceso, desempeñaron un papel importante dos tradiciones: una, de importancia sólo para Lorentz y Wiechert, era la tradición electrodinámica corpuscular de Weber y sus seguidores, que operaba con partículas eléctricas en interacción instantánea, pero sin concepto de campo; la otra tradición, por el contrario, tenía sus raíces firmemente afincadas en la electrodinámi-

ca de campos de Maxwell. Ya en 1894, Wiechert había expresado claramente la convicción de que la masa material podía ser un epifenómeno y que la única masa verdadera era de origen electromagnético, consistente en las hipotéticas partículas eléctricas que describía como excitaciones en el éter. La sugerencia de Wiechert anticipaba la imagen electromagnética del mundo, pero su trabajo en esta área se vio en parte oscurecido por los trabajos de Lorentz y de teóricos alemanes como Max Abraham y Adolf Bucherer.

En 1881, el joven J. J. Thomson mostró que cuando una esfera cargada se mueve a través del éter, adquirirá una especie de masa aparente, de manera análoga a una esfera que se mueve a través de un fluido incomprimible. Para una esfera de carga *e* y radio *R*, encontró que la masa inducida electromagnéticamente sería $m' = 4/15\ e^2/R^2c$. Esta primera introducción de la masa electromagnética sería mejorada por el excéntrico ingeniero e inventor británico Olive Heaviside, quien en 1889 derivó la expresión $m' = 2/3\ e^2/R^2c$. Al contrario que Thomson, quien no pensaba que la «masa aparente» fuera real, Heaviside la consideraba tan real como la masa material. Era parte de la masa mensurable o «efectiva». Wilhelm Wien obtuvo una mejora adicional en 1900, en un artículo titulado significativamente «Sobre la posibilidad de una fundación electromagnética de la mecánica». Wien confirmó la expresión de Heaviside en el límite de bajas velocidades y añadió el importante resultado de que la masa electromagnética debería depender de la velocidad y diferir de la de Heaviside si la velocidad se aproximaba a la de la luz. La manera exacta en la que la masa de un electrón, o cualquier partícula cargada, debería depender de la velocidad se convirtió pronto en un problema de crucial importancia en la nueva física electrónica. El artículo de Wien en 1900 se ha considerado el primer pronunciamiento claro de la cosmovisión electromagnética, lo cual (a pesar de la formulación anterior de Wiechert) está justificado dado que Wien asumió que toda masa era de naturaleza electromagnética. La materia, argumentó Wien, consistía en electrones, y los electrones eran partículas *de* la electricidad, no minúsculas esferas en las cuales residía la electricidad. Además, sostuvo que las leyes de la mecánica de Newton tenían que entenderse electromagnéticamente y que, si no se podía conseguir una correspondencia completa, la teoría electrónica era la más profunda y fundamental de las dos teorías.

El primer modelo electrónico detallado fue construido por Max Abraham, un físico de Gotinga que se había graduado con Planck en 1897. Según escribía Abraham en 1902, la cuestión más importante de la física era ésta: «¿Se puede explicar completamente la inercia de los electrones mediante la acción dinámica de su campo sin utilizar la ayuda de una masa que sea independiente de la carga eléctrica?» (Goldberg 1970, p. 12). Era, en parte, una pregunta retórica. Abraham creía que la respuesta *debía* ser afirmativa. Llevó a cabo un detallado estudio de la dinámica del electrón en un artículo de 1903, que en muchos aspectos contrastaba con el artículo de Einstein sobre relatividad de dos años más tarde. Mientras que el artículo de Einstein era simple matemáticamente, el de Abraham era un *tour de force* matemático; y mientras que el de Einstein ocupaba 31 páginas, el de Abraham, nada menos que 75. Ambos trabajos apa-

recieron en *Annalen der Physik*, una revista que frecuentemente incluía artículos de una longitud que sería inaudita en una revista de física moderna. En sus trabajos de 1902-1903, Abraham argumentaba que el único tipo de electrón que podía entenderse totalmente en términos electromagnéticos era una esfera rígida con una distribución de carga superficial o volumétrica uniforme. Para un electrón tal, calculó su masa (debida exclusivamente a los propios campos del electrón) y encontró una variación con la velocidad que, a primer orden en $\beta^2 = (v/c)^2$, puede escribirse $m = m_0 (1 + 2/5\, \beta^2)$. Aquí, m_0 denota la masa electromagnética en reposo, $2/3\, e^2/(R^2c)$. Volveremos en breve al importante trabajo de Abraham, que no fue la única teoría electrónica de la época.

La idea de que la masa variaba con la velocidad era parte del programa de investigación de Lorentz tal como lo desarrolló a partir de 1899. El enfoque de Lorentz diferia del de Vien y Abraham, y era reacio a seguirles en su creencia de que toda masa es electromagnética. En 1904, sin embargo, superó su precaución natural y en su teoría del electrón de ese año apoyó la cosmovisión electromagnética: no sólo era la masa de sus electrones de origen electromagnético, sino que también argumentó que toda materia en movimiento (consistente en electrones o no) debe obedecer la variación de la masa característica de los electrones. En 1906, en una clase impartida en la Universidad de Columbia, afirmó «yo en particular estaría bastante dispuesto a adoptar una teoría electromagnética de la materia y de fuerzas entre partículas materiales». Continuó: «En lo tocante a la materia, muchos argumentos conducen a la conclusión de que sus partículas elementales siempre portan cargas eléctricas y de que éstas no son meramente accesorias sino esenciales. Introduciríamos lo que a mí me parece un dualismo innecesario si consideráramos estas cargas y lo demás que pudiera haber en estas partículas como cosas totalmente distintas entre sí» (Lorentz 1952, p. 45). El electrón de Lorentz era, sin embargo, distinto de la partícula rígida de Abraham. Era un electrón deformable, lo cual quería decir que se contraería en la dirección del movimiento y así adquiriría una forma elipsoidal en lugar de la forma esférica que tendría en reposo. Abraham se opuso a este aspecto de la teoría de Lorentz porque la estabilidad del electrón requeriría alguna fuerza no electromagnética; esto, sostenía Abraham, atentaba contra el espíritu de la cosmovisión electromagnética. En qué consistía exactamente este espíritu, sin embargo, era algo que podía debatirse; no todos los físicos veían en la teoría de Abraham la esencia de la cosmovisión electromagnética. Así, en 1908 Minkowski consideraba al electrón rígido «un monstruo» comparado con las ecuaciones de Maxwell y observaba ingeniosamente que «acercarse a las ecuaciones de Maxwell con el concepto del electrón rígido me parece la misma cosa que ir a un concierto con los oídos taponados con algodones» (Miller 1981, p. 350).

Para las variaciones de la masa, Lorentz dedujo la famosa expresión del inverso de la raíz cuadrada que todavía se asocia hoy en día con la teoría de la relatividad de Einstein: $m = m_0 (1- \beta^2)^{-1/2}$ o, aproximadamente, $m = m_0 (1+ 1/2\, \beta^2)$. Se ve rápidamente que la diferencia práctica entre las fórmulas de Lorentz y Abraham es pequeña, y que se requieren electrones a muy altas velocidades para distinguir experimentalmente entre ellas.

Los electrones rígidos de Abraham y los deformables de Lorentz eran los modelos más importantes, pero no los únicos. El físico alemán Adolf Butcherer, e independientemente Paul Langevin en París, propusieron en 1904 otro modelo más, caracterizado por un volumen invariable durante el movimiento, de tal manera que la contracción del electrón en una dimensión se vería compensada por una inflación en la otra. La teoría de Bucherer-Langevin conducía a una relación masa-velocidad distinta tanto de la de Abraham como de la de Lorentz. Con el objeto de decidir entre las distintas teorías (incluyendo la de Einstein, que se veía generalmente como una variante a la de Lorentz), se apelaba a los experimentos de precisión. Antes de seguir con el tema de la teoría y los experimentos, consideraremos algunos de los aspectos más generales de la cosmovisión electromagnética.

La teoría electrónica como una cosmovisión

En 1904 la cosmovisión electromagnética había despegado y había surgido como una sustituta altamente atractiva de la visión mecánica, que se percibía generalmente como desfasada, materialista y primitiva. Como indicativo de la fuerza de la nueva teoría, no sólo era discutida en revistas especializadas, sino que también empezó a aparecer en libros de texto de física. Por ejemplo, Bucherer introdujo su teoría electrónica en un libro de texto de 1904. De más importancia era el libro de texto de electrodinámica que Abraham publicó el mismo año y que, durante sucesivas ediciones, llegó a ser ampliamente utilizado tanto en Alemania como en el exterior durante más de veinte años. El trabajo era una revisión de un libro de texto sobre la teoría de Maxwell escrito por August Föppl en 1894 (utilizado por, entre otros, el joven Einstein), pero mientras que Föppl había proporcionado una derivación mecánica de las ecuaciones de Maxwell, Abraham utilizó su versión revisada para invertir la prioridad de Föppl entre mecánica y electromagnetismo. En un volumen anexo de 1905, Abraham se manifestó sin muchas reservas como un misionero de la cosmovisión electromagnética.

En conmemoración del centenario de la compra del territorio de Luisiana por parte de los Estados Unidos, se celebró un Congreso de las Artes y las Ciencias en San Luis en septiembre de 1904. Entre los delegados físicos se encontraban varios físicos internacionalmente conocidos, incluyendo a Rutherford, Poincaré y Boltzmann. El mensaje general de muchas de las comunicaciones fue que la física estaba en un momento decisivo y que la teoría electrónica estaba en camino de establecer un nuevo paradigma de la física. En su informe general sobre los problemas de la física-matemática, Poincaré habló de la «ruina general de los principios» que caracterizaban a la época. Poincaré mismo era un importante contribuyente a la teoría electrónica y ahora estaba dispuesto a concluir que «la masa de los electrones, o, al menos, de los electrones negativos, es de origen exclusivamente electro-dinámico [...] no existe otra masa más que la inercia electro-dinámica» (Sopka y Moyer 1986, p. 292). La comunicación de otro físico francés, Paul Langevin, de treinta y dos años, fue más detallada, pero no menos grandiosa, no menos elocuente y no menos a favor de la cosmovisión electromagnética. Langevin

argumentó a favor de su modelo del electrón (y el de Bucherer), si bien la estructura detallada del electrón no era realmente lo que importaba, lo importante era la llegada de una nueva era de la física. Como explicaba Langevin al final de su exposición:

> La rápida perspectiva que acabo de bosquejar está llena de promesas, y creo que raras veces en la historia de la física se ha tenido la oportunidad de mirar tan lejos hacia el pasado o tan lejos hacia el futuro. La importancia relativa de las partes de este inmenso y apenas explorado dominio parece diferente hoy en día de lo que parecía en el siglo anterior: desde el nuevo punto de vista, los distintos planes se disponen en un nuevo orden. La idea eléctrica, la última descubierta, aparece hoy en día como dominando al resto, como el lugar de elección donde el explorador siente que puede fundar una ciudad antes de avanzar hacia nuevos territorios [...] La tendencia actual de hacer que las ideas electromagnéticas ocupen un lugar preponderante está justificada, como he intentado mostrar, por la solidez del doble fundamento en la cual se apoya la idea del electrón [las ecuaciones de Maxwell y el electrón empírico] [...] Aunque aún muy reciente, las concepciones de las cuales he intentado proporcionar una idea resumida son suficientes para penetrar hasta el mismo corazón de toda la física y para servir como fértil germen en torno al cual cristalizar, en un nuevo orden, hechos muy distantes entre sí [...] Esta idea ha experimentado un inmenso desarrollo en los últimos años, lo cual ha causado que el marco de la vieja física se haya hecho añicos, y que el orden de ideas y leyes establecidas haya sido desbancado, con el objeto de que se ramifiquen de nuevo en una organización que uno predice será simple, armoniosa y fructífera. (*Ibid.*, p. 230)

Se pueden encontrar en la literatura de alrededor de 1905 abundantes evaluaciones similares a las de Langevin, y muchas veces utilizando los mismos códigos e imaginería. Raras veces incluían referencias a la teoría cuántica o a la nueva teoría de la relatividad.

La metodología tras el programa de investigación electromagnético era marcadamente reduccionista. Su objetivo era establecer una teoría unitaria de toda la materia y de las fuerzas que existen en el mundo. La base de la teoría era la electrodinámica maxwelliana, posiblemente en una versión modificada o generalizada; era un programa enormemente ambicioso. Cuando se completara, nada quedaría sin explicar, al menos en principio. En este sentido, era claramente un ejemplo de una «teoría del todo». Las partículas elementales, los fenómenos atómicos y cuánticos, e incluso la gravitación se contemplaban como manifestaciones del sustrato fundamental del mundo: el campo electromagnético. Los intentos de explicar la gravitación en términos de interacciones electromagnéticas se remontaban a la década de 1830, cuando el físico italiano Ottaviano Mossotti propuso una teoría de este tipo. Más avanzado el siglo, la idea se desarrolló con detalles matemáticos por los alemanes Wilhelm Weber y Friederich Zöllner, que basaban sus teorías sobre la noción de partículas eléctricas en interacción instantánea. Las teorías electrogravitatorias se continuaron debatiendo después de que la electrodinámica de campos se convirtiera en el marco dominante de la electricidad y el magnetismo. Por ejemplo, en 1900 Lorentz derivó, basándose en su teoría electró-

nica, una ley gravitatoria que consideraba una posible generalización de la de Newton. Los intentos de unificar las dos fuerzas básicas de la naturaleza, generalmente mediante la reducción de la gravitación al electromagnetismo, eran parte del programa electromagnético, pero a pesar de mucho trabajo, no se encontró ninguna solución satisfactoria.

La cosmovisión electromagnética fue también un tema de interés fuera de la física, y también se discutía en círculos filosóficos. Llegó a influir incluso en la política, como queda ilustrado por *Materialismo y crítica empírica* de Lenin, un trabajo político-filosófico que Lenin escribió cuando era un exiliado en Ginebra y Londres, en 1908. En su intento de formular una concepción de la naturaleza dialéctico-materialista, Lenin citaba párrafos de Poincaré, Righi, Lodge y otros físicos para mostrar que la física estaba en un estado de crisis. «El electrón», escribió el que sería líder de la Unión Soviética, «es tan *inexhaustible* como el átomo; la naturaleza es infinita, pero *existe* infinitamente». No está del todo claro lo que Lenin quería decir con esto, pero quizá no pretendía que quedara claro.

La atmósfera revolucionaria de la física teórica queda ilustrada también por un encuentro de la Asociación Alemana de Científicos y Médicos que tuvo lugar en Stuttgart en 1906, es decir, tras la introducción de la relatividad de Einstein. La mayoría de los principales teóricos electrónicos participaron y la opinión general estaba a favor de la cosmovisión electromagnética en su forma pura, por ejemplo como la desarrollada por Abraham. Se criticó la teoría de Lorentz por su necesidad de una fuerza estabilizadora no electromagnética; tan sólo Planck defendió la teoría de Lorentz (y de Einstein) contra esta objeción teórica. El electrón rígido era incompatible con el postulado de relatividad, argumentó Planck, y esto hablaba en favor de la teoría de Lorentz. Para Abraham y sus aliados, hablaba en contra. Entre los aliados estaba Arnold Sommerfeld, de treinta y siete años, que más tarde se convertiría en un destacado físico cuántico y atómico, pero que por aquel entonces se había especializado en la teoría electrónica tan de moda. Sommerfeld dejó claro que consideraba la teoría de Lorentz-Einstein irremediablemente conservadora, un intento de salvar lo poco que podía salvarse de la vieja y moribunda cosmovisión mecanicista. Aunque Planck admitió que el programa electromagnético era «muy bello», no dejaba de ser sólo un programa todavía, respondía, y uno que sería difícil de completar de manera satisfactoria. Para Sommerfeld, esta actitud era de un injustificado «pesimismo».

Las escaramuzas generacionales son muchas veces parte de los movimientos revolucionarios y, de acuerdo con Sommerfeld, el nuevo paradigma en la física ofrecía un especial atractivo a la generación joven: «sobre la cuestión de principios formulada por el señor Planck», dijo Sommerfeld, «Sospecharía que los caballeros por debajo de cuarenta años preferirían el postulado electrodinámico, y los mayores de cuarenta, el postulado mecánico-relativista» (Jungnickel y McCormmach 1986, p. 250). La generalización era probablemente bastante justa, aunque había excepciones. Una de ellas era Einstein, diez años más joven que Sommerfeld. Otra era Lorentz, muy por encima del límite de los cuarenta años. Menos de una década después del encuentro de Stuttgart,

la situación entre revolucionarios y conservadores se había invertido. Ahora, Abraham escribía en 1914, «los físicos de la vieja escuela tienen que menear la cabeza y dudar de esta revolución en la concepción de la masa [...] Los jóvenes físicos matemáticos que llenaban las aulas en la época de su influencia estaban entusiasmados con la teoría de la relatividad. Los físicos de la generación anterior [...] en su mayoría contemplaban con escepticismo a los atrevidos jóvenes que intentaban defenestrar los fiables fundamentos de todas las medidas físicas basándose en unos pocos experimentos que todavía eran debatidos por los expertos» (Goldberg 1970, p. 23).

Uno de los temas más debatidos en torno a la cosmovisión era el estatus del éter. Existía una amplia y confusa variedad de puntos de vista acerca del éter y su relación con la teoría electrónica, pero sólo una minoría de físicos quería deshacerse del éter. El punto de vista mayoritario sobre 1905 parece haber sido que el éter era una parte indispensable de la nueva física electrónica: de hecho, otra expresión más del campo electromagnético. Por ejemplo, en sus clases de 1906 en la Universidad de Columbia, Lorentz hablaba del éter como «el receptáculo de la energía electromagnética y el vehículo para muchas y quizá todas las fuerzas que actúan sobre la materia ponderable [...] no tenemos motivo para hablar de su masa o de fuerzas que se le aplican» (Lorentz 1952, p. 31). El éter sobrevivió al ataque contra la «vieja física», pero era un éter altamente abstracto, desprovisto de atributos materiales. Así, en 1909 Planck escribía que «en vez de lo que se denomina éter libre, existe el vacío absoluto [...] Creo que el único punto de vista consistente es el que no adscribe ninguna propiedad física al vacío absoluto como el único consistente» (Vizgin 1994, p. 17). Planck no era el único que utilizaba el término «vacío» como un sinónimo de «éter». Desde esta posición, sólo hay un pequeño paso para declarar al éter inexistente. Ésta era precisamente la conclusión del físico alemán Emil Cohn, un especialista en electrodinámica que desarrolló su propia versión de la teoría electrónica sin éter entre 1900 y 1904. Uno podía oponerse al principio de relatividad y al éter, como hizo Cohn; u oponerse al principio de relatividad y aceptar el éter, como hizo Abraham; o aceptar tanto el principio de relatividad como el éter, como hizo Lorentz; o aceptar el principio de relatividad y oponerse al éter, como hizo Einstein. No es de extrañar que muchos físicos estuvieran confusos.

Experimentos sobre la variación de la masa

La respuesta a la confusión eran, obviamente, los experimentos. En principio, al menos, debía ser posible comprobar las predicciones de las distintas teorías y, de esta manera, decidir cuál se acercaba más a la verdad. De hecho, los primeros experimentos realizados con el objeto de determinar la distribución entre masa electromagnética y mecánica ya se habían realizado cuando Abraham propuso su modelo electrónico. Walter Kaufmann, el físico de Gotinga que había medido en 1897 la razón carga/masa de los rayos catódicos a la vez que Thomson, comenzó una serie de experimentos en 1900, en los que deflectaba haces de electrones en campos eléctricos y magnéticos. Para encontrar la parte de la masa del electrón que depende de la velocidad (es decir,

la masa electromagnética), se necesitaban electrones a velocidades extremas; con este objeto, Kaufmann utilizó rayos beta, que habían sido recientemente identificados como electrones moviéndose a velocidades de hasta un 90 por 100 o más de la velocidad de la luz.

Kaufmann, que no sólo era un excelente experimental sino un capaz teórico, fue un pionero partidario de la teoría electrónica y la cosmovisión electromagnética. Hay pocas dudas de que su entusiasmo por la nueva física alteraba sus interpretaciones de sus datos experimentales. En 1901 concluyó que aproximadamente un tercio de la masa del electrón era de origen electromagnético. Cuando se vio expuesto a la nueva teoría de Abraham, rápidamente volvió a interpretar sus datos y consiguió llegar a una conclusión bien distinta: que toda la masa del electrón era electromagnética, de acuerdo con el punto de vista de Abraham. Kaufmann y Abraham eran colegas en la Universidad de Gotinga y esta relación personal, además de la profunda simpatía de Kaufmann por la cosmovisión electromagnética, llevó a Kaufmann a conclusiones que no estaban justificadas tan sólo con sus datos. En 1903 concluyó que no sólo los electrones de los rayos beta, sino también los de los rayos catódicos, se comportaban de acuerdo con la teoría de Abraham.

Tras 1905, cuando la teoría de Lorentz (o la «teoría de Lorentz-Einstein») apareció como contrincante a la de Abraham, Kaufmann llevó a cabo nuevos experimentos con el objeto de resolver la cuestión sobre la variación de la masa con la velocidad. Los complejos experimentos conducían a resultados que aparentemente refutaban la teoría de Lorentz, pero que estaban en razonable acuerdo con la de Abraham y también con las predicciones de Bucherer y Langevin. A la vista de los nuevos datos, Kaufmann concluyó que el intento de cimentar la física sobre el postulado de relatividad «se consideraría un fracaso». Sus experimentos se discutieron animadamente en el encuentro de 1906 en Stuttgart, donde la mayoría de los participantes estaba del lado de Kaufmann, a favor del electrón rígido y contra el electrón deformable y el principio de relatividad. Quedó patente, en todo caso, que la interpretación correcta de los experimentos estaba lejos de ser directa, y Planck alertó de que existían muchos aspectos inciertos y cuestionables en el análisis de Kaufmann, por lo que sugirió que los experimentos no eran capaces de decidir entre las teorías de Abraham y Lorentz y que se necesitaban otros nuevos.

La reacción de los teóricos variaba. Abraham estaba contento con aceptar la conclusión de Kaufmann, y Lorentz, con mucho menor entusiasmo, también la aceptaba. Lorentz sentía que toda su teoría estaba amenazada, de hecho, que se había probado errónea. Como escribió a Poincaré, «por desgracia, mi hipótesis sobre el acortamiento de los electrones está en contradicción con los nuevos resultados de Kaufmann, y debo abandonarla. No tengo, por tanto, ni idea de qué hacer» (Miller 1981, p. 337). En términos filosóficos, Lorentz actuaba como un «falsacionista», de acuerdo con la filosofía de la ciencia de Karl Popper. No fue así con Einstein, cuya respuesta estaba bastante de acuerdo con las recomendaciones del filósofo Imre Lakatos. Einstein ignoró al principio la presunta refutación de Kaufmann, pero sospechaba que en la reducción e interpretación de

los datos se habían cometido errores. Sí, los experimentos estaban en desacuerdo con la teoría de la relatividad pero no, eso no implicaba que la teoría fuera errónea: forzosamente significaba que los experimentos eran erróneos. «En mi opinión», escribía Einstein en 1907, «ambas teorías [la de Abraham y la de Bucherer-Langevin] tienen una probabilidad muy pequeña, porque sus suposiciones esenciales sobre la masa de electrones en movimiento no son explicables en términos de sistemas teóricos que abarquen un mayor rango de fenómenos» (*ibid.*, p. 345). La actitud de Einstein (y de Planck también) no consistía simplemente en negar la validez del experimento de Kaufmann porque no estuviera de acuerdo con una teoría favorecida. Einstein y Planck indagaron profundamente en los detalles experimentales, analizaron la situación global cuidadosamente y por fin concluyeron que había buenas razones para sospechar de errores sistemáticos.

En cualquier caso, la juvenil confianza de Einstein en su teoría pronto resultó confirmada. En experimentos en 1908, Bucherer, tan competente como Kaufmann tanto en teoría como en experimentos, midió la deflacción eléctrica y magnética de los rayos beta de una manera distinta a Kaufmann. Sus resultados también eran distintos y conducían a una confirmación de la teoría de Lorentz-Einstein. Respecto al hecho de que Bucherer mismo hubiera propuesto una teoría electrónica rival, que había recibido cierto apoyo por los experimentos de Kaufmann, es notable que no dudara en criticar estos experimentos y en concluir a partir de los suyos que sólo la teoría de Lorentz era viable. Por aquel entonces, Bucherer había perdido confianza en su propia teoría del electrón de volumen constante porque la contradecían los fenómenos de dispersión. Por lo tanto, consideraba que su experimento era una prueba entre sólo dos alternativas, la de Abraham y la de Lorentz. Los experimentos de Bucherer eran mucho más transparentes que los de Kaufmann y más difíciles de criticar. Pero por supuesto no estaban por encima de la crítica y no constituyeron un experimento crucial a favor a la teoría de Lorentz-Einstein. Durante los años siguientes los experimentos continuaron, sobre todo en Alemania, e hizo falta cierto tiempo para que la situación experimental se estabilizara con el resultado de que quedó generalmente aceptado que la variación de la masa de Lorentz-Einstein estaba confirmada experimentalmente. En 1914 la cuestión estaba resuelta en su mayor parte. Sin embargo, no era una estabilización completa, y las discusiones continuaron muchos años después de que la teoría de Einstein fuera aceptada y de que la cosmovisión electromagnética cayera en el olvido.

No seguiremos con esta historia salvo para mencionar que la cuestión de la variación de la masa adquiriría una dimensión política después de 1920, cuando empezó a florecer el antirrelativismo en algunas facetas de la vida cultural alemana. Muchos físicos conservadores ansiaban la llegada del día en el que la teoría de Einstein fuera reemplazada por una teoría basada en el éter o en conceptos electromagnéticos. Irónicamente, entre estos conservadores se hallaban algunos de los antiguos partidarios de la cosmovisión electromagnética que, años atrás, se habían considerado a sí mismos audaces progresistas en su lucha contra el anticuado mecanicismo. Abraham, otrora archirrevolucionario, fue uno de los que nunca aceptó la relatividad y que protestó

contra una física sin éter. Bucherer, otro de los revolucionarios electromagnéticos, que contribuyó de mala gana a la victoria de la relatividad, se convirtió en los años veinte en un ardiente antirrelativista en el ala derecha de la física alemana. Ante esta situación, se llevaron a cabo nuevos experimentos sobre la variación de la masa del electrón, muchas veces con claras intenciones de refutar la teoría de la relatividad y, de hecho, algunos de los antirrelativistas concluyeron que sus experimentos confirmaban la vieja teoría de Abraham y refutaban la de Einstein. Otros físicos, incluyendo a Becherer, aceptaban la fórmula de Lorentz-Einstein pero eran cuidadosos al distinguir entre la fórmula y la teoría de Einstein. «Hoy», escribía Bucherer en 1926, «la confirmación de la fórmula de Lorentz no se puede aducir como una prueba de la teoría de la relatividad einsteiniana» (Kragh 1985, p. 99).

El declive de una cosmovisión

Los experimentos electrónicos fueron un factor en el declive de la cosmovisión electromagnética, pero formaban sólo un factor entre otros muchos. Mientras que los experimentos están sujetos a pruebas experimentales, las cosmovisiones no lo están. De hecho, la posibilidad de una física totalmente electromagnética, que englobara todos los aspectos de la realidad física, nunca fue probada como errónea, sino que se desvaneció según fue perdiendo su atractivo inicial. Es difícil ser revolucionario por un periodo largo, especialmente si las elevadas esperanzas de un futuro mejor no muestran señales de hacerse realidad. En 1914 como muy tarde la cosmovisión electromagnética había perdido su magia y el número de sus partidarios disminuyó a un pequeño grupo en la periferia de la física convencional. Poco después del estallido de la Primera Guerra Mundial, Emil Warburg editó un libro en una serie denominada *Cultura contemporánea (Kultur der Gegenwart)*, con treinta y seis artículos resumiendo distintas áreas de la física. Entre los autores de esta obra semioficial se contaban físicos prominentes de la cultura alemana, incluyendo a Wiechert, Lorentz, Rubens, Wien, Einstein, Kaufmann, Zeeman y Planck. El contenido del libro puede servir como indicativo de la composición de la física en aquellos tiempos:

Mecánica	79 páginas
Acústica	22 páginas
Calor	163 páginas
Electricidad	249 páginas
Óptica	135 páginas
Principios generales	85 páginas

Los capítulos sobre el calor incluían no sólo la radiación del cuerpo negro, sino también el artículo de Einstein sobre «Atomística teórica», es decir, la teoría cinética de la materia. Entre los trece artículos de la categoría sobre electricidad, había uno sobre telegrafía inalámbrica, uno sobre rayos X y dos sobre radiactividad. El artículo sobre la

teoría de la relatividad, escrito por Einstein, estaba colocado en la categoría de Principios generales. La cosmovisión electromagnética apenas era visible y aparecía tan sólo indirectamente en el artículo de Lorentz sobre «La teoría de Maxwell y la teoría electrónica».

¿Por qué perdió vapor el programa electromagnético? El proceso del declive fue complejo, e involucró tanto motivos científicos como razones relacionadas con cambios en el clima cultural de la época. Como se ha mencionado, las predicciones experimentales, como las que se derivan de la teoría de Abraham, no estaban de acuerdo con los resultados de los experimentos reales. Por otro lado, ésta no era realmente una causa principal del declive, ya que el electrón rígido no era un ingrediente necesario de la cosmovisión electromagnética: de mayor importancia era la competición de otras teorías que o bien se oponían a la imagen electromagnética o amenazaban con convertirla en superflua. Aunque la teoría de la relatividad se confundía a veces con la teoría electrónica de Lorentz o se mantenía que era compatible con la cosmovisión electromagnética, alrededor de 1912 era evidente que la teoría de Einstein era de naturaleza muy distinta. No tenía casi nada que decir sobre la estructura de los electrones y con el creciente reconocimiento del punto de vista relativista, esta cuestión –algunos años antes considerada esencial– cambió drásticamente de estatus. Para muchos físicos, se convirtió en una pseudo-cuestión. Igual que el surgimiento de la teoría de la relatividad hacía la vida difícil para los entusiastas electromagnéticos, también lo hacía el surgimiento de la teoría cuántica. Sobre 1908, Planck llegó a la conclusión de que existía un conflicto fundamental entre la teoría cuántica y la electrónica, y recibió un cauto apoyo de Lorentz y otros expertos. Parecía que no había manera de derivar el espectro del cuerpo negro sobre una base puramente electromagnética. Según la teoría cuántica fue ganando en importancia, la teoría electrónica iba perdiéndola por momentos: lo peor que le puede ocurrir a una revolución proclamada es que no sea necesaria.

En general, la teoría electrónica tenía que competir con otros desarrollos en la física que no dependían de esta teoría y después de 1910 los nuevos desarrollos en la física sustrajeron interés de la teoría electrónica. Tantos nuevos e interesantes sucesos ocurrían que ¿por qué molestarse con el complicado y demasiado ambicioso intento de fundar toda la física en campos electromagnéticos? El átomo nuclear de Rutherford, los isótopos, la teoría atómica de Bohr, la difracción de rayos X por cristales, el descubrimiento de Stark del desdoblamiento de las líneas espectrales, la interpretación del sistema periódico de Moseley basada en rayos X, la extensión de Einstein de la relatividad a la gravitación y otras innovaciones absorbieron la energía intelectual de los físicos y dejaron atrás la cosmovisión electromagnética. Era un bello sueño, de acuerdo, pero ¿era física? Se avanzaba rápidamente en física atómica y, mientras que se entendía cada vez mejor la estructura del átomo, iba siendo cada vez más difícil mantener la cosmovisión electromagnética. La carga positiva había sido un problema de la teoría atómica desde 1896, cuando el efecto Zeeman indicó que los electrones llevan carga negativa. Una teoría de la materia en armonía con cosmovisión electromagnética necesitaba

electrones positivos, pero no se encontró ninguno. En 1904, un físico británico, Harold A. Wilson, sugirió que la partícula alfa era el electrón positivo («exactamente similar en carácter a un electrón negativo ordinario») y que su masa era de origen puramente electromagnético, es decir, satisfacía la expresión $2/3\ e^2/R^2c$. El precio que había que pagar era que la partícula alfa debía tener entonces un radio varios miles de veces menor que el del electrón negativo. Con la identificación de las partículas alfa con los átomos de helio, el precio resultó ser demasiado alto. Otras sugerencias para introducir electrones positivos electromagnéticos no tuvieron mayor éxito y con el descubrimiento de Rutherford de las verdaderas partículas positivas –los núcleos atómicos de masa muchos miles de veces la del electrón– la atractiva simetría entre cargas elementales positivas y negativas se perdió.

Por otra parte, los avances en física atómica podían ser interpretados (como de hecho a veces se hacía) de tal manera que estuvieran cualitativamente de acuerdo con la visión electromagnética. Rutherford mismo se inclinaba por esta idea, de que toda la materia era de naturaleza eléctrica, y en 1914 argumentó que la pequeñez del núcleo de hidrógeno era justamente lo que cabía esperar si era de origen enteramente electromagnético. Otros investigadores pioneros de física nuclear le siguieron, y no fue sino hasta los años veinte en que la masa electromagnética desapareció de esta área de la física. Esto no significa, sin embargo, que Rutherford y sus colegas fueran partidarios de la cosmovisión electromagnética o de la teoría electrónica en el sentido continental. No es un accidente que la mayoría de los que contribuyeron a la teoría electrónica fueran alemanes y que muy pocos, si es que alguno, fueran ingleses. Existían sutiles diferencias entre las actitudes alemana y británica. Una cosa era creer en la teoría electrónica de la materia, como hacían muchos físicos británicos, y otra eliminar todos las leyes y conceptos mecánicos en favor de otros electromagnéticos, como los que Abraham y sus aliados intentaban alcanzar. En todo caso, la hipótesis de que los núcleos atómicos eran de origen electromagnético se apoyaba en la fe y no en una evidencia experimental. Al contrario que los electrones, los núcleos o iones no podían acelerarse a las velocidades extremas que eran necesarias para probar qué parte de su masa era electromagnética y qué parte mecánica.

Teorías de campo unificadas

En 1910, el programa electromagnético original de Wien, Abraham y sus aliados había encontrado serios problemas, en parte por su oposición a la progresista teoría de la relatividad. No existía necesariamente contradicción alguna entre la visión electromagnética y la relatividad especial, sin embargo, y en la segunda década del siglo, unos pocos físicos revitalizaron el programa electromagnético incorporándolo dentro de la teoría de la relatividad de Einstein. El mismo Einstein estaba muy interesado en este tipo de teoría electromagnética unificada, que también atraía el interés y respeto de otros físicos matemáticos, incluyendo a Hilbert, Pauli, Sommerfeld, Born y Weyl. El físico alemán Gustav Mie, de la Universidad de Greifswald, fue el más productivo y emi-

nente de los contribuyentes a la última fase del programa electromagnético. Al contrario que Abraham y la mayoría de los partidarios de la primera fase del programa, Mie aceptaba la teoría de la relatividad y utilizaba al máximo sus conceptos y métodos matemáticos. Por ejemplo, la invariancia de Lorentz y la noción de un espacio-tiempo tetradimensional eran partes importantes de la teoría de Mie. Sin embargo, Mie estaba en completo acuerdo con la visión física de sus predecesores: que en último término el mundo consiste en estructuras en un éter electromagnético. La siguiente descripción de 1911 proporciona la esencia de la cosmovisión electromagnética y muestra que el punto de vista de Mie era básicamente el mismo que el de físicos anteriores como Larmor, Wien, Lorentz y Abraham:

> Las partículas elementales materiales [...] son simplemente lugares singulares en el éter en los que convergen las líneas de esfuerzo eléctrico del éter; brevemente, son «nudos» del campo eléctrico en el éter. Es muy notable que estos nudos estén siempre confinados en estrechos límites, es decir, en lugares llenos de partículas elementales [...]. Toda la diversidad del mundo sensible, a primera vista sólo un desordenado espectáculo de brillantes colores, se reduce evidentemente a procesos que tienen lugar en una única sustancia mundial: el éter. Y los procesos mismos, a pesar de toda su increíble complejidad, satisfacen un armonioso sistema de unas pocas leyes simples y matemáticamente transparentes. (Vizgin 1994, pp. 18 y 27)

La teoría de Mie, que desarrolló en tres largos artículos en 1912-1913 (que sumaban 132 páginas), era primeramente una teoría de las partículas elementales. Mie quería incluir también la gravitación en su teoría, pero no consiguió dar cuenta del campo gravitatorio mediante las mismas ecuaciones electromagnéticas que utilizaba en su teoría de la materia.

Mie creía que el electrón era una minúscula porción del éter en un «estado singular particular» y lo representaba como si consistiera en «un núcleo que tiende continuamente a una atmósfera de carga eléctrica que se extiende hasta el infinito» (Vizgin 1994, p. 28). Es decir, estrictamente el electrón no tenía un radio definido. Cerca del centro del electrón, la fuerza de los campos electromagnéticos sería enorme y Mie pensaba que en tales circunstancias las ecuaciones de Maxwell ya no serían válidas. Por lo tanto, desarrolló un conjunto de ecuaciones electromagnéticas no lineales generalizadas que, a distancias relativamente grandes del núcleo del electrón, se correspondían con las ecuaciones del electromagnetismo ordinarias. A partir de las ecuaciones fundamentales de Mie, era posible calcular las cargas y masas de las partículas elementales, expresadas mediante una «función del mundo». Éste era un avance notable y la primera vez que un modelo de campos para partículas se había desarrollado de una manera matemáticamente precisa. Es interesante que Mie, al desarrollar el formalismo, utilizara métodos matriciales, una rama de la matemática aplicada que posteriormente se introduciría en la mecánica cuántica. El avance estaba limitado al programa matemático, sin embargo, y la grandiosa teoría era claramente estéril en lo tocante a la fí-

sica real. En 1913 se conocían dos partículas elementales, el electrón y el protón, y sus propiedades se podían derivar de la teoría *en principio*. Lástima que, de momento, era sólo en principio, ya que la forma de la función del mundo que aparecía en las ecuaciones era desconocida. Por otro lado, tampoco se podía probar que no hubiera funciones del mundo compatibles con la existencia de electrones y protones, y los creyentes en el programa de Mie podían por lo tanto sostener que futuros desarrollos podían llevar al éxito.

Aunque la teoría de Mie nunca llegó a los resultados que se esperaban, no dejó de tener consecuencias. Influyó en algunos de los trabajos de Einstein, Hilbert, Weyl y otros y hasta tan tarde como los años treinta, Max Born reconsideró la teoría de Mie como un candidato para un marco clásico para el desarrollo de una electrodinámica cuántica consistente. Lo que atraía a algunos físicos matemáticos de los años veinte no era tanto los detalles de la teoría de Mie como su espíritu y métodos. Como Weyl expresó en 1923: «Estas leyes físicas [de Mie], por tanto, nos permiten calcular la masa y carga de los electrones, y los pesos atómicos y cargas atómicas de los elementos individuales mientras que, hasta ahora, siempre habíamos aceptado a estos últimos constituyentes de la materia como cosas dadas, con sus propiedades numéricas» (Vizgin 1994, p. 33).

El objetivo de una teoría unificada es entender la riqueza y diversidad del mundo en términos de un único esquema teórico. La masa y carga del electrón, por ejemplo, se consideran generalmente propiedades contingentes, es decir, simplemente resulta que las cantidades son las que son («cosas dadas»). No se siguen de manera única de ninguna ley física y, por esta razón, es posible que pudieran ser distintas de lo que son. De acuerdo al punto de vista de los unificacionistas, la masa y carga de un electrón (y, en general, las propiedades de todas las partículas elementales) deben derivarse en última instancia de la teoría; deben dejar de ser cantidades contingentes para convertirse en cantidades gobernadas por leyes. No sólo esto, sino que también el número y tipo de partículas elementales debe seguirse de la teoría; no sólo las partículas que se conocen en un momento dado, sino las que todavía no se han descubierto. En otras palabras, una teoría unificada verdaderamente de éxito debería ser capaz de predecir la existencia de partículas elementales; ni más de las que existen en la naturaleza, ni menos. Ésta es una tarea formidable, especialmente porque las teorías físicas no pueden evitar apoyarse en lo que se conoce empíricamente y por lo tanto deben reflejar lo más puntero de la física experimental. En 1913 se conocían el electrón y el protón, y por tanto Mie y sus contemporáneos diseñaron sus teorías unificadas de acuerdo con la existencia de estas partículas. Pero las impresionantes teorías del programa electromagnético no tenían poder predictivo real. Con toda su grandeza y avanzada maquinaria matemática, la teoría de Mie era un fruto de su época y no estaba en absoluto preparada para la avalancha de descubrimientos de partículas que sucedió en los años treinta. Cuando Gustav Mie murió en 1957, el mundo de las partículas y campos era radicalmente diferente del de 1912. Era mucho más complejo y mucho menos atractivo para la clase de grandes teorías unificadas de las que él había sido un pionero en la

primera parte del siglo. Unas décadas después de la muerte de Mie, por otra parte, las grandes teorías unificadas volverían al primer plano de la física y prometerían una cosmovisión unificada que, en un sentido general, compartía algunas de sus características con el antiguo programa electromagnético. Para más información sobre estas teorías unificadas modernas, véase el capítulo 27.

CAPÍTULO 9

La física en la industria y en la guerra

La física industrial

La física no es sólo la académica, enseñada y cultivada en universidades e instituciones similares con el propósito de penetrar aun más profundamente en los secretos de la naturaleza. Una gran e importante parte de la física consiste en la aplicación del conocimiento físico con fines tecnológicos, o más bien en desarrollar nuevas clases de conceptos, teorías y aparatos que pueden utilizarse para tales fines. La física aplicada o de ingeniería ha resultado ser esencial en muchas ocasiones para el progreso tecnológico, pero sólo en raros casos han surgido nuevas tecnologías directamente a partir del conocimiento científico. En la mayoría de los casos de las llamadas tecnologías basadas en ciencia, la conexión entre ciencia básica y tecnología es compleja e indirecta.

La utilidad de la física no es, por supuesto, un asunto moderno. Por el contrario, la idea de que la física pueda llevar a innovaciones tecnológicas beneficiosas para la humanidad es una parte integral de la historia de la física desde los días de Bacon y Galileo. Sin embargo fue sólo en la segunda mitad del siglo XIX cuando, de manera apreciable, la retórica iba seguida de la práctica. Según el siglo tocaba a su fin, iba siendo todavía más evidente que la física podría tener un potencial tecnológico de la misma magnitud que la química, la ciencia que había probado su carácter de fuerza productiva antes y más visiblemente. Éste era un importante elemento en el creciente apoyo a la investigación física de la época y era una opinión compartida por muchos físicos. Uno de ellos era Emil Warburg, el director de un nuevo instituto de física en la Universidad de Friburgo. Con ocasión de la inauguración del instituto en 1891, argumentaba: «En lo tocante a la física, la llamada ascensión de las ciencias naturales, que caracteriza los tiempos modernos, no se basa en el número y significación de los descubrimientos ni en los principios de investigación. Se debe mucho más al efecto mucho mayor que esta ciencia ejerce sobre la vida civil y sobre las ramas de la tecnología que dependen de ella. Y, podríamos añadir, a los contraefectos que resultan a su vez» (Cahan 1985, p. 57).

A partir de esa época, un número creciente de físicos empezó a trabajar en física aplicada, técnica o industrial, bien en industrias privadas, en instituciones politécnicas o en instituciones de investigación sin ánimo de lucro. La «física industrial» despegó en los años veinte, pero aún antes del estallido de la Primera Guerra Mundial esta clase de física no académica, y otras, se establecieron firmemente en los países más importantes.

Las áreas de la física más adecuadas para la aplicación industrial eran los campos clásicos como termodinámica, electromagnetismo, óptica y ciencia de materiales; la «nueva física», con campos como radiactividad, relatividad y teoría cuántica y atómica, no producía inmediatamente aplicaciones prácticas a gran escala. Pero hasta un campo nuevo y exótico como la radiactividad era de interés industrial, y el trabajo con estándares de radiación se convirtió en una parte importante de los primeros laboratorios que se especializaron en medidas radiactivas. Marie Curie se suele presentar tradicionalmente como la heroína de la física pura, pero la pureza de su trabajo no impidió que estuviera bastante ocupada estableciendo un estándar internacional del radio y asegurando lazos con la industria francesa del radio. Para Curie, el trabajo con orientación a la industria era una parte natural e integrada de su trabajo científico. A partir de 1905 aproximadamente existían estrechos lazos entre el laboratorio de los Curie y la compañía de Armet de Lisle, un industrial químico. La dimensión industrial se extendía al laboratorio y a los cursos sobre radiactividad ofrecidos en el Institut du Radium en París, que atraían a muchos científicos que trabajaban en la industria. «No era poco común que los colaboradores de Curie llevaran una doble vida en ciencia e industria», observaba un reciente estudio (Roqué 1997b, p. 272). El otro centro principal de la investigación radiactiva inicial, el Instituto de Investigación del Radio en Viena, fundado en 1908, servía a funciones industriales y metrológicas similares a las del instituto de París. Los físicos vieneses cooperaban con la Compañía Auer, que procesaba minerales de uranio con el fin de obtener el valioso radio (en forma de cloruro de radio) que era de tan gran interés para la ciencia y la industria.

El Physikalisch-Technische Reichsanstalt en Berlín, fundado en 1887 por iniciativa de Werner von Siemens y Hermann von Helmholtz, era quizá la más importante de las instituciones pioneras de física aplicada. El objetivo del instituto de Berlín era aplicar la física a innovaciones técnicas útiles para la industria alemana y así, por implicación, para el país. Ya que, como Siemens escribió al gobierno prusiano, «en la competición entre naciones, que en estos momentos se incentiva tan activamente, el país que primero explora nuevos caminos [científicos] y primero los desarrolla en ramas establecidas de la industria, es el que tiene una ventaja decisiva» (Hoddeson *et al.* 1992, p. 13). Helmholtz, el primer presidente del Reichsanstalt, estaba ansioso por convertirlo en una institución de investigación y no meramente un sitio donde el conocimiento establecido se aplicara pasivamente a la resolución de problemas industriales. Su sucesor, Friedrich Kohlrausch, en el cargo entre 1895 y 1905, expandió considerablemente la institución y la convirtió en el principal centro mundial de física aplicada y medidas de precisión. En 1903 el Reichsanstalt consistía en diez edificios y daba empleo a 110 personas, de las cuales 41 se ocupaban del trabajo científico. La importancia del Reich-

sanstalt en promover y asistir a las industrias de alta tecnología era también reconocida en otros países, y otras naciones establecieron instituciones similares. El Laboratorio Físico Nacional en Inglaterra (1898), la Oficina Nacional de Estándares de los Estados Unidos (1901) y el Instituto de Investigación Física y Química en Japón (1917) fueron todos fundados imitando al Reichsanstalt. Aunque en el instituto se llevaba a cabo mucha investigación original, tanto básica como aplicada, las tareas prácticas, por ejemplo, pruebas, eran de mayor importancia económica y se llevaban gran parte de los recursos. Un enorme número de pruebas se realizaron, especialmente de termómetros y lámparas eléctricas (por ejemplo, entre 1887 y 1905, se probaron casi 250.000 termómetros). Este trabajo rutinario contribuyó al declive científico del Reichsanstalt y a la deserción de científicos de talento hacia la universidad, lo cual fue un problema especialmente durante la presidencia de Emil Warburg (1905-1922).

Donde más avanzada era la aplicación de la física en las industrias privadas era en los Estados Unidos, donde varios laboratorios de investigación industrial se fundaron en la primera parte del siglo, principalmente en la industria eléctrica. Al contrario que en los laboratorios tradicionales de prueba y control de calidad, la investigación científica ocupaba un lugar prominente en los nuevos laboratorios, cuyo personal estaba formado en universidades, muchas veces con grados doctorales. También al contrario que la situación en muchos países europeos, existían estrechos contactos entre físicos académicos estadounidenses y los que trabajaban para grandes industrias. Los físicos académicos trabajaban a menudo como consultores para la industria, y los físicos aplicados contribuían frecuentemente a la literatura científica académica. La diferencia entre física pura y aplicada podía ser difícil de distinguir a veces. En 1913 los físicos de laboratorios industriales componían el 10 por 100 aproximadamente de los miembros de la American Physical Society; siete años después, cuando el número de miembros se había doblado, componían el 25 por 100 aproximadamente. La importancia científica de los laboratorios industriales queda ilustrada adicionalmente por la distribución de artículos en *Physical Review*. En 1910, sólo el 2 por 100 de los artículos tenían su origen en laboratorios industriales; cinco años después, la proporción se había elevado drásticamente al 14 por 100 y en 1920 el número era del 22 por 100. Las compañías con investigación más intensiva eran, con mucho, los dos gigantes electrotécnicos, General Electric y American Telephone and Telegraph Company (AT&T), que contribuían más a la física pura que muchas universidades. La fuerza científica de las dos compañías queda ilustrada por las cifras de los años 1925-1928, cuando 27 contribuciones a *Physical Review* provenían de General Electric y 26 de Bell Telephone Laboratories, la rama de investigación de AT&T. En comparación, la Universidad de Columbia contribuyó con 25 artículos y Yale con 21 (el primero era el Instituto de Tecnología de California, con 17 artículos). En aquella época, Bell Laboratories era la institución más grande y más rica del mundo para la investigación industrial. Con un personal técnico de 3.390 personas y un personal de investigación de 600 científicos e ingenieros, Bell Laboratories inició la era de la gran ciencia. Los gastos de AT&T en investigación y desarrollo, medidos en dólares de 1948, crecieron de 6,1 millones en 1916 a 10,8 millo-

nes en 1920; en 1926 los gastos fueron 16,6 millones y en 1930 la cifra se incrementó a 31,7 millones. (A pesar de que las cifras sean tan altas, son sólo un preludio al desarrollo aun más explosivo que ocurrió después de 1945. En 1981, poco después de que AT&T fuera sentenciada a descomponerse en varias compañías menores e independientes, el número de empleados de Bell Laboratories era de 24.078, de los cuales 3.328 tenían grado de doctor. En ese año, AT&T proporcionó a Bell Laboratories no menos de 1.630 millones de dólares.

Aunque AT&T era excepcional, era sólo una de un número creciente de compañías estadounidenses que empleaban a científicos. En 1931, más de 1.600 compañías informaron al Consejo de Investigación Nacional sobre laboratorios que empleaban casi 33.000 personas. Nueve años después, más de 2.000 empresas tenían laboratorios de investigación, que empleaban a un total de unas 70.000 personas.

Las industrias europeas siguieron la tendencia estadounidense, pero no al mismo ritmo e intensidad. Los relativamente escasos físicos de laboratorios industriales en Europa no contribuyeron mucho a la literatura de física pura. La compañía electromecánica más grande de Europa, la compañía Siemens en Alemania, reconocía el valor de la investigación científica aplicada pero no tenía un departamento central de investigación comparable a los de sus rivales estadounidenses. Sólo en 1920 se formó tal departamento, bajo el físico Hans Gerdien, formado en Gotinga. El nuevo laboratorio de investigación publicaba su propia revista, titulada *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*, similar en miras y contenido al *The Bell System Technical Journal*. Sin embargo, la revista de Siemens no tuvo la misma importancia científica que su contraparte estadounidense. Consideraremos a continuación dos importantes casos de física aplicada, los dos relacionados con aspectos de la electrónica.

Electrones trabajando, I: la telefonía a larga distancia

El teléfono de Alexander Graham Bell no fue un producto de la ciencia. Durante las primeras dos décadas de la telefonía, el nuevo sistema de telecomunicaciones se desarrolló de manera empírica, guiado (muchas veces, erróneamente) sólo por la teoría telegráfica que William Thomson había introducido en 1855. Cuando resultó que era difícil conseguir una buena comunicación de voz a distancias de más de unos pocos cientos de kilómetros, los ingenieros sugirieron reducir la resistencia y capacidad del sistema de línea. La autoinductancia se consideraba generalmente de una cantidad dañina, que se podía reducir pasando de hilos de hierro a hilos de cobre; sin embargo, estos métodos para extender la distancia para hablar tuvieron un efecto bastante limitado y sobre 1895 quedó cada vez más claro que los métodos empíricos de los ingenieros telegráficos nunca producirían telefonía de calidad a largas distancias. Era el momento de aplicar procedimientos más científicos basados en la física.

De hecho, estos procedimientos se habían aplicado ya en 1887, cuando Aimé Vaschy en Francia y Oliver Heaviside en Inglaterra analizaron teóricamente la transmisión de corrientes telefónicas a partir la teoría eléctrica fundamental. Obtuvieron fórmulas

para la variación de la atenuación y distorsión con los parámetros eléctricos de la línea y concluyeron que la autoinductancia era beneficiosa: cuanto más hubiera en una línea, mejor. Los trabajos de Vaschy y Heaviside no se materializaron en métodos prácticos sino hasta mucho después y, en Inglaterra, las recomendaciones de base científica de Heaviside encontraron la resistencia de ingenieros pertenecientes al poderoso Servicio de Correos. Fue en Estados Unidos y, en una escala menor en Dinamarca, donde la teoría de Vaschy-Heaviside se transformó en tecnología práctica por primera vez.

No se daba alta prioridad a la investigación científica en los primeros años de la Bell Telephone Company, pero Hammond Hayes, un físico formado en la universidad que era empleado de Bell, urgió a que la compañía pusiera más énfasis en la investigación. En 1897 contrató a George Campbell para que desarrollara el tipo de cables de alta inductancia que había sugerido Heaviside. En su enfoque y formación, Campbell era distinto de los ingenieros y técnicos que trabajaban entonces en telegrafía y telefonía, y esta diferencia fue de crucial importancia para su éxito. Campbell tenía una fuerte formación en física teórica, obtenida en el MIT, Harvard y tres años en Europa, donde estudió con eminencias como Poincaré, Boltzmann y Felix Klein. Totalmente familiarizado con los trabajos de Vaschy y Heaviside, Campbell utilizó sus habilidades matemáticas para desarrollar una teoría de cables (o antenas) «cargadas» con bobinas de inducción espaciadas discretamente. El resultado, completado en el verano de 1899, fue un análisis matemático de la línea cargada de bobinas, que predecía dónde colocar las bobinas en el circuito, cuánto cargarlas, y la distribución de cobre más eficaz entre el cable y las bobinas. Campbell se dio cuenta de que la solución tecnológica no podía obtenerse mediante métodos empíricos y que sería interesante para la compañía atacar el problema a través de la física teórica. Como escribió en un memorando de 1899, «por economía, hay que avanzar la teoría lo más posible y dejar lo menos posible a métodos de ensayo y error» (Kragh 1994, p. 155). La innovación de Campbell tenía un objetivo práctico, pero no era por ello menos científica. Publicó su teoría de cargas en 1903, no en una revista de ingeniería, sino en la distinguida revista de física *Philosophical Magazine*.

Michael Pupin, un profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Columbia nacido en Serbia, obtuvo a la vez, e independientemente, resultados muy similares a los de Campbell. Como Campbell, Pupin tenía una fuerte formación en física teórica (había estudiado bajo Kirchhoff y Helmholtz) y no confiaba en los métodos de ensayo y error que todavía dominaban gran parte de la profesión ingenieril. Poseía la ventaja frente a Campbell de que era un investigador de universidad libre, no un hombre de empresa y, por esta razón, entre otras, consiguió en 1900 obtener una patente para su sistema de carga de bobinas (o «pupinización», como se conocería). Tras una larga disputa legal, AT&T compró los derechos para explotar la patente y la patente alemana de Pupin fue similarmente comprada por Siemens y Halske.

La primera línea cargada con bobinas se construyó en 1901; a lo largo de la siguiente década el sistema de carga se convirtió en el esqueleto de un gran número de líneas de larga distancia, tanto en América como en Europa. La innovación basada en el trabajo de Campbell y Pupin fue un gran éxito comercial y una gran propaganda

para la utilidad de la física teórica. A finales de 1907, el grupo de compañías Bell Telephone había equipado 138.000 km de circuito de cable con unas 60.000 bobinas de carga. Cuatro años más tarde, cuando el número de bobinas se había incrementado a 130.000, la compañía estimó que había ahorrado unos 100 millones de dólares con la invención de circuitos cargados de inducción. Al igual que los físicos y químicos desempeñaron un papel protagonista en la invención y desarrollo del sistema de carga en Estados Unidos, también lo hicieron en Europa, donde las compañías alemanas eran las líderes del campo. La primera línea telefónica europea equipada con bobinas Pupin la construyeron Siemens y Halske en 1902, basándose en experimentos de August Ebeling y Friedrich Dolezalek. Sus carreras indican los crecientes contactos entre físicos de la industria y académicos: Ebeling había estudiado con Helmholtz, trabajado con Werner von Siemens y pasado cinco años en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt hasta que se convirtió en un ingeniero principal en Siemens y Halske; Dolezalek había estudiado con Nernst y, tras un periodo con Siemens y Hanske, volvió al mundo académico para sustituir a su antiguo profesor como director del instituto de química física en la Universidad de Gotinga.

En el caso de Alemania y la mayoría de los otros países europeos, había otro factor importante que faltaba en la escena estadounidense: instituciones gubernamentales. La tecnología de telecomunicaciones alemana estaba apoyada por el Reichpost, que tenía su propio equipo de investigadores cualificados. Su Departamento Imperial de Pruebas Telegráficas, fundado en 1888, incluía a Franz Breisig, un antiguo estudiante de Heinrich Hertz y posiblemente el principal experto europeo en teoría de comunicaciones eléctricas.

La pupinización, o carga de bobinas, era el método más importante de extender la distancia de la telefonía, pero no era el único. Para cables, y especialmente para cables submarinos, la alternativa era enrollar densamente los alambres de cobre con hierro blando. La idea de la carga continua se remontaba a Heaviside, pero hicieron falta quince años hasta que se implementó como tecnología práctica. Esto fue llevado a cabo por un ingeniero danés, Carl E. Krarup, que diseñó el primer cable submarino cargado, que se tendió entre Dinamarca y Suecia en 1902. Krarup, que había sido estudiante de investigación bajo Wilhelm Wien en la Universidad de Würzburg, pertenecía a la nueva generación de ingenieros con formación científica. Los cables continuos del tipo de Krarup se utilizaron extensivamente durante tres décadas, por ejemplo, en 1921 en el cable de Cayo Oeste a La Habana, de 190 km.

Con el éxito del método de carga, se hizo importante diseñar las bobinas Pupin lo más eficazmente posible, es decir, con una máxima permeabilidad magnética y una mínima pérdida de energía debida a corrientes de Foucault secundarias. La ciencia de los materiales empezó a ser de crucial importancia para las empresas telefónicas. Ya en 1902, Dolezalek había obtenido una patente para un núcleo de inducción compuesto de un polvo de hierro finamente mezclado con una sustancia aglutinadora aislante, pero la idea se transformó en una innovación tan sólo una década después. En 1911, AT&T había organizado una rama dentro de su departamento de Ingeniería en Wes-

tern Electric con el propósito de aplicar la ciencia básica a problemas de telefonía de manera sistemática. Uno de los primeros frutos del nuevo programa de investigación fue la invención en 1916 de un núcleo de polvo de hierro. Éstos se empezaron a producir con fines comerciales rápidamente en las plantas de fabricación de Western Electric en Hawthorne, Illinois, que en 1921 alcanzaría una producción semanal de 25.000 libras de polvo de hierro. Al mismo tiempo, los investigadores de Western Electric trabajaban para encontrar un sustituto del hierro con propiedades magnéticas superiores como material de carga. Gustaf Elmen, nacido en Suecia, desarrolló un método de calentar y enfriar aleaciones de níquel y hierro de tal manera que sus permeabilidades fueran elevadas y su pérdida por histéresis baja; el resultado fue la «permaleación» que consistía en aproximadamente 20 por 100 hierro y 80 por 100 níquel. En los 20 esta aleación reemplazó al hierro en los núcleos Pupin y, sobre 1930, las compañías AT&T producían más de un millón de núcleos de bobinas de permaleación por año.

De una importancia similar fue la aplicación de la permaleación como material de carga para telegrafía transatlántica. En Western Electric se desarrolló una teoría fiable para este propósito, principalmente por Oliver Buckley, un físico educado en Cornell que se había incorporado a la compañía en 1914 para trabajar con válvulas de vacío y materiales magnéticos. Tras mucho trabajo teórico y experimental, se obtuvo una teoría realista que podía guiar la construcción de cables telegráficos cargados de alta velocidad. Cuando en 1924 se probó el cable de 3.730 km entre Nueva York y las Azores, operado por la Western Union Telegraph Company y manufacturado por una compañía británica de cables, cumplió todas las expectativas. La velocidad operativa de 1.920 letras por minuto era de cuatro veces superior al récord de los cables convencionales de tipo Kelvin. La increíble velocidad superó la capacidad de los equipos terminales existentes e hizo necesaria la construcción de grabadoras de alta velocidad para estar a su altura. El éxito de éste y otros cables cargados con permaleación revitalizó la telegrafía transoceánica y demostró, una vez más, el valor práctico y económico de la investigación física. En 1924, reflexionando sobre su larga trayectoria como investigador en el sistema Bell, Campbell concluía que «la electricidad es ahora sobre todo un campo para las matemáticas, y todos los avances en él se logran principalmente mediante las matemáticas».

Electrones trabajando, II: válvulas de vacío

El tubo de electrones (o tubo de radio, o válvula) es una de las más importantes invenciones del siglo XX. Su historia se remonta a 1880, cuando Edison se dio cuenta de que si una plancha se derretía en una de sus bombillas lumínicas recién inventadas, una pequeña corriente fluía desde el filamento a la plancha. El efecto Edison atrajo el interés de ingenieros eléctricos. Uno de ellos, el inglés John Ambrose Fleming, demostró en 1889 que las partículas emitidas por el filamento tenían carga negativa. Una década después, se llegó a la conclusión de que estas partículas eran electrones. En 1904, Fleming, entonces profesor de ingeniería eléctrica en el University College de Londres

y consultor técnico de la Compañía Marconi de Telegrafía Inalámbrica, descubrió que las lámparas que usaban el efecto Edison podían utilizarse como detectores de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Fleming construyó la primera válvula de vacío, un diodo que fue patentado por la Compañía Marconi en 1905, pero el invento no tuvo éxito. El diodo resultó demasiado poco sensible como para hacer práctico su uso como detector en telegrafía inalámbrica; en lugar de ello, fue el estadounidense Lee De Forest quien construyera la primera válvula de vacío práctica. Aunque al principio no fuera un gran éxito comercial, el invento de De Forest en 1906 del triodo (o «audión») fue el comienzo de la era electrónica. El austriaco Robert von Lieben, otro de los pioneros de las válvulas, construyó diodos, y más tarde triodos, para su utilización como amplificadores en telefonía. Por aquel entonces, el término «válvula de vacío» era equívoco, porque ni De Forest, ni Lieben, ni otros reconocieron al principio la importancia de un elevado vacío. El diodo original de De Forest era en efecto una válvula de vacío, pero no estaba altamente evacuada; creía que los restos de gas eran esenciales para el correcto funcionamiento de la válvula. Las de Lieben de 1910 estaban sólo parcialmente vaciadas y operaban con un vapor enrarecido con mercurio.

Las válvulas de vacío se convirtieron en maravillas tecnológicas en 1912, principalmente gracias a la investigación de compañías privadas. El experto en el área de AT&T era Harold Arnold, un joven físico con un doctorado recién obtenido con Millikan en Chicago. Cuando De Forest mostró su triodo a la Bell Telephone Company, Arnold se dio cuenta de que el tosco dispositivo se podía desarrollar para construir un potente amplificador o repetidor. Rápidamente construyó su propia versión mejorada, en particular mediante un completo vaciado con una de las nuevas bombas de alto vacío inventadas por Wolfgang Gaede en Alemania. (La electrónica de válvulas, igual que otras partes de la física aplicada y experimental, dependía crucialmente del progreso en la tecnología del vacío.) Mientras que los primeros tipos de válvulas habían sido «blandas» –con un vacío imperfecto– el trabajo en Bell Laboratories produjo triodos «duros», en los que la corriente pasaba de manera puramente termoiónica y no por ionización. Otras mejoras realizadas por Arnold y su equipo incluían el reemplazo del filamento candente por un cátodo recubierto de óxido de calcio o de bario; estos cátodos, construidos por primera vez por el físico Arthur Wehnelt en 1904, podían operar a temperaturas más bajas, y así prolongaban la vida de las válvulas. Les llevó menos de un año desarrollar válvulas repetidoras operativas; éstas se probaron en la línea telefónica Nueva York-Washington en 1913, y dos años más tarde demostraron su valor comercial asegurando las conversaciones telefónicas a través de la primera línea transcontinental, entre Nueva York y San Francisco. Robert Millikan, que participó en la ceremonia de inauguración, escribió en su autobiografía: «A partir de esa noche, el electrón –hasta entonces básicamente un juguete de científicos– había entrado sin duda en el campo como un potente agente en el suministro de las necesidades comerciales e industriales del hombre [...] La válvula electrónica amplificadora es ahora el cimiento en la totalidad del arte de comunicaciones, y esto a su vez es, al menos en parte, lo que ha hecho posible su aplicación a una docena de otras artes. Fue un gran día

tanto para la ciencia como para la industria, cuando quedaron enlazadas mediante el desarrollo del tubo amplificador electrónico.» (Millikan 1951, p. 136). Millikan no mencionó que el gran avance real en la tecnología de válvulas de vacío vino como resultado de la demanda durante la Primera Guerra Mundial. Cuando los Estados Unidos entraron en la guerra en 1917, la producción semanal no pasaba de 400 válvulas; dos años después, la producción era de unas 80.000 por semana.

Los desarrollos en Alemania eran paralelos a los de Estados Unidos, pero menos rápidos y menos eficaces. Cuatro de las mayores compañías electrotécnicas (Siemens y Halske, Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Felten und Guilleaume y Telefunken) formaron un consorcio en 1912 que adquirió las patentes de Lieben con el fin de desarrollarlas comercialmente. Fue un error centrarse en las válvulas llenas de gas de Lieben. Hicieron falta dos años para que los alemanes se dieran cuenta de que el futuro eran las válvulas de alto vacío; entonces, Telefunken comenzó la producción de triodos de vacío. Durante la guerra, los esfuerzos alemanes para perfeccionar la tecnología de las válvulas de vacío se aceleró (como lo hizo en otros países beligerantes). Uno de los físicos que investigaban los tubos era Walter Schottky, un estudiante de Planck que repartía su talento entre relatividad general y electrónica. Trabajando a tiempo parcial para Siemens y Halske, Schottky desarrolló y mejoró la válvula de vacío introduciendo una red adicional entre el ánodo y la red de control habitual. Aunque el trabajo de Schottky en esta área no condujo inmediatamente a un tubo práctico, fue importante porque incluía un estudio de la física fundamental de las válvulas de vacío y condujo al descubrimiento de efectos de ruido discreto, que Schottky explicó mediante una contribución a la teoría de la información que es ahora clásica. La visión de Schottky fue considerablemente desarrollada por investigadores posteriores, especialmente Harry Nyquist (en 1928) y Claude Shannon (en 1948), ambos de Bell Laboratories.

En los Estados Unidos, no sólo AT&T se ocupaba de la tecnología de válvulas, sino también General Electric. En 1912 William Coolidge, un físico formado en la universidad que trabajaba en el Laboratorio de Investigación de la General Electric, había desarrollado las primeras lámparas incandescentes con filamento de tungsteno y había iniciado trabajos para mejorar los tubos de rayos X. Su asistente, Irving Langmuir, había estudiado química física con Nernst en Gotinga, donde también siguió las clases matemáticas de Felix Klein. Después de unos años como profesor en un instituto politécnico estadounidense, llegó a General Electric en 1909 y siguió allí durante más de cuarenta años. Fue el primer científico de empresa en ganar un premio Nobel (el de Química, en 1932) y probablemente el único en contar con una montaña bautizada con su nombre –el monte Langmuir en Alaska–. En General Electric, Langmuir comenzó un programa de investigación sobre descargas eléctricas en gases y vacíos que le condujo a sugerir que la introducción de gases inertes en la bombilla incandescente extendería la vida de la bombilla. El descubrimiento se convirtió rápidamente un una innovación altamente rentable. Al mismo tiempo, estudió la emisión de electrones en un vacío como un mecanismo del tubo de vacío. Langmuir se dio cuenta de que el proceso esencial en los diodos y triodos era la emisión de electrones, que requería un alto

vacío. Hasta entonces, los ingenieros que trabajaban con los nuevos tubos tenían un escaso entendimiento de los mecanismos físicos, aunque una teoría general de la emisión de electrones por cuerpos calientes había sido publicada por el físico británico Owen Richardson en trabajos de 1901 a 1903.

Richardson, estudiante de J. J. Thomson y especialista en teoría electrónica, acuñó el término «termoiónico» en 1909 y formuló una ley empírica que relacionaba el ritmo de emisión termoiónica con la temperatura del metal; durante la siguiente década, trabajó intensamente para probar y perfeccionar la «ley de Richardson». La teoría fenomenológica de Richardson acabó siendo reconocida como la explicación científica de las válvulas de vacío, pero durante los años de formación de los tubos, 1904-1908, su papel fue insignificante. Fue sólo más tarde cuando la teoría asumió una importancia fundamental en la electrónica de válvulas. Cuando Richardson ganó el premio Nobel en 1929, Carl Oseen enfatizó, en su discurso de presentación, la estrecha conexión entre el trabajo de Richardson en física pura y el increíble progreso en la tecnología de comunicación:

> Entre los grandes problemas que los científicos que trabajan en la investigación en electrotécnica están intentando resolver hoy en día, está el de permitir que los hombres puedan conversar estando cada uno de ellos en cualquier parte del mundo. En 1928 las cosas habían alcanzado un estado en el que podíamos empezar a establecer comunicación telefónica entre Suecia y Norteamérica [...] Cada dueño de un aparato receptor de válvulas sabe de la importancia de la válvula en el aparato –la válvula, cuya parte esencial es el filamento incandescente– [...] El hecho más importante es que la opinión del señor Richardson sobre el fenómeno termoiónico con leyes fijadas fue confirmada totalmente. Mediante este hecho se obtuvo una sólida base para la aplicación práctica del fenómeno. El trabajo del señor Richardson ha supuesto el arranque y fomento de la actividad técnica que ha conducido al progreso del cual acabo de hablar.

La presentación del trabajo de Richardson por parte de Oseen como la base científica a partir de la cual se consiguieron maravillas tecnológicas es exagerada. Hasta 1913, aproximadamente, la tecnología de válvulas se apoyaba muy poco en teorías científicas, y el mismo Richardson mostró poco interés en cuestiones tecnológicas. En su discurso del Nobel, no mencionó ni la válvula de vacío ni la tecnología electrónica de la cual se suponía que era el padre científico. Por otro lado, Langmuir conocía bien la teoría de Richardson, la cual utilizó para obtener un profundo conocimiento del funcionamiento de las válvulas de vacío. En particular, Langmuir confirmó la expresión de Richardson para la corriente termoiónica y comprobó de modo concluyente que la emisión de electrones no requería un gas residual. El conocimiento científico del triodo que Langmuir poseía fue un importante factor en el desarrollo de la válvula por parte de General Electric. Los investigadores de General Electric, liderados por Langmuir y su colega Saul Dushman, tuvieron lista su válvula de alto vacío mejorada en 1913. Uno de los resultados fue un litigio de patentes prolongado en el tiempo con AT&T.

El descubrimiento de la difracción de electrones en 1927, que valdría un premio Nobel, tuvo su punto inicial en la investigación que estaba en conexión con la demanda Arnold-Langmuir sobre las patentes. Clinton J. Davisson, un estudiante de doctorado de Richardson, se había incorporado al departamento de ingeniería de Western Electric en 1917. Dos años después Davisson y su asistente, Lester Germer, comenzaron a trabajar sobre la emisión termoiónica de los cátodos de Wehnelt. Aunque su trabajo no influyera en el resultado del proceso legal, como Arnold y Davisson esperaban al principio, acabó desarrollándose de una manera muy satisfactoria y totalmente inesperada. En su programa de investigación extendido, Davisson y Germer empezaron a estudiar las emisiones de electrones desde superficies metálicas bajo bombardeo electrónico. En 1924 estos experimentos de dispersión electrón-electrón produjeron patrones que Davisson interpretaba como un efecto de la estructura cristalina del metal, pero no parecía que se obtuviera nada más de los experimentos. Los físicos de Bell no entendían los electrones como ondas. Se tuvo que esperar a la primavera de 1926, cuando Davisson pasó unas vacaciones en Inglaterra, y por casualidad supo de las ideas de Louis de Broglie de 1924: que los electrones podrían ser difractados mediante cristales. Por aquel entonces, Davisson no conocía la nueva mecánica cuántica, pero sus colegas europeos le contaron que la teoría de Schrödinger podría ser la clave para entender sus experimentos. Mientras volvía a Nueva York, estudió la nueva mecánica ondulatoria. En una carta a Richardson, escribió, «Estoy trabajando todavía sobre Schrödinger y otros y creo que estoy empezando a tener una idea de lo que va todo. En particular creo que sé el tipo de experimento que deberíamos realizar con nuestro aparato de esparcimiento para probar la teoría» (Russo 1981, p. 145).

La nueva dirección del viejo programa de investigación produjo el famoso experimento de Davisson-Germer, que probó experimentalmente la fórmula de De Broglie de que a los electrones que se mueven a velocidad v se les puede adscribir una longitud de onda $\lambda = h/mv$. Como era apropiado, el primer informe completo del descubrimiento se publicó en la edición de abril de 1927 del *Bell Laboratories Record*. Diez años después, Davisson, junto con George P. Thomson, recibió el premio Nobel por el descubrimiento.

Físicos en la guerra de los químicos

Hasta el estallido de la Primera Guerra Mundial en 1914, la mayoría de los científicos se consideraban miembros de una clase supranacional, una república del aprendizaje donde la nacionalidad era menos importante que los logros científicos. Cuando la ideología del supranacionalismo chocó con la realidad de la guerra, sin embargo, quedó casi inmediatamente destruida y fue rápidamente reemplazada con un chovinismo no menos primitivo que el jaleado por otros grupos en las naciones europeas. Antes del final de 1914, había empezado una guerra de propaganda dentro de la real, una guerra combatida sobre el papel por científicos y otros académicos. Los físicos no eran ya simplemente físicos, ahora eran físicos alemanes, físicos franceses, físicos austriacos o físi-

cos británicos. Un importante factor en la *Krieg der Geister* (la guerra de los sabios) fue un manifiesto publicado en octubre de 1914 en el cual noventa y tres científicos, artistas y académicos alemanes trataban de justificar las acciones de su ejército, incluyendo su ataque sobre la neutral Bélgica y la destrucción de Lovaina. En el *Aufruf* o manifiesto «Al mundo civilizado», los autoproclamados «heraldos de la verdad» alemanes negaba que Alemania hubiera causado la guerra y que los soldados actuaran sin la disciplina y honor que se esperarían del ejército de una nación civilizada. Se mantenía que todas esas acusaciones eran infames mentiras. Para los científicos alemanes, militarismo y cultura estaban inseparablemente ligados: «Si no fuera por el militarismo alemán, la civilización alemana habría sido extirpada hace tiempo [...] ¡Tengan fe en nosotros! Créannos, llevaremos esta guerra hasta el final como una nación civilizada, para la cual el legado de un Goethe, un Beethoven y un Kant es tan sagrado como sus propios corazones y hogares» (Nicolai 1918, p. xii). Entre los firmantes del manifiesto estaban varios físicos y químicos destacados, incluyendo a Planck, Nernst, Ostwald, Haber, Lenard y Röntgen. Einstein, uno de los pocos físicos que se oponía a la guerra y al clima general de chovinismo, no firmó. Por el contrario, firmó un contramanifiesto a favor de la paz y la cooperación que un fisiólogo, Georg Nicolai, había esbozado. Sin embargo, el «Llamamiento a los europeos» no tuvo éxito: sólo firmaron cuatro personas.

El manifiesto alemán provocó contundentes réplicas de científicos en Inglaterra y Francia. Por ejemplo, se suspendió su condición de miembros extranjeros a los científicos alemanes de la Academia de Ciencias de París que firmaron el manifiesto. Poco después, los académicos franceses atacaron a sus colegas del otro lado del Rin y a todo lo que defendían, o lo que los franceses pensaban que defendían. Aunque se admitía que los alemanes eran buenos organizadores de la ciencia, según la propaganda francesa les faltaba originalidad y tendían a apropiarse ideas que se originaban en otros lugares. En algunos casos, los científicos franceses sostenían que la ciencia alemana era intrínsecamente distinta de, y por su puesto inferior a, la ciencia de naciones civilizadas como Francia. De acuerdo con el físico y químico Pierre Duhem, *la science allemande* tenía su propio carácter y estaba marcada por las deplorables características mentales de la raza alemana. Los físicos alemanes eran simplemente incapaces de pensar intuitivamente y les faltaba el sentido común que era necesario para enlazar las teorías físicas abstractas con el mundo real. Como típico ejemplo de teoría abstracta alemana, Duhm mencionaba la teoría de la relatividad, con su absurdo postulado de la velocidad de la luz como límite superior de velocidad. Otro autor francés, un biólogo, escogía la teoría cuántica como un ejemplo de «delirio matemático-metafísico» alemán. En un libro de 1916, escribía: «El principio de la relatividad es el cimiento de una evolución científica que se puede comparar especialmente con el futurismo y el cubismo en las artes [...] encontramos un buen ejemplo de este delirio matemático-metafísico en la teoría de los cuantos de Max Planck, catedrático de física en Berlín y uno de los 93 intelectuales del otro lado del Rin. Planck [...] introduce [...] átomos de calor, de luz, de energía mecánica (!), de hecho, de energía en general; como resultado de la teo-

ría de la relatividad estos átomos poseen incluso una masa dotada de inercia (!!)» (Kleinert 1978, p. 520). Es irónico que las teorías que los científicos franceses patrióticos consideraban en 1916 típicas de la mente alemana fueran exactamente las mismas que los científicos alemanes nazis, veinte años después, considerarían los principales ejemplos de una mente judía, no alemana. La reacción contra la ciencia alemana era algo más moderada en Gran Bretaña, pero no existía un entendimiento y no se llevaron a cabo intentos de reconciliación. En un artículo en *Nature* en octubre de 1914, William Ramsay, premio Nobel de Química, escribió que «los ideales alemanes están infinitamente alejados de la concepción del verdadero hombre científico». Aunque Ramsay reconocía la brillantez de científicos alemanes individuales, globalmente la ciencia mundial podría prescindir fácilmente de los alemanes: «Los mayores avances en el pensamiento científico no han sido realizados por miembros de la raza alemana», escribió. «Por lo que se puede ver, de momento, la restricción de los teutones aliviará al mundo de un alud de mediocridad».

Cuando se declaró la guerra, muchos científicos en los países beligerantes ofrecieron sugerencias a los militares acerca de cómo podrían emplear sus calificaciones al servicio de la nación. Las autoridades políticas y militares eran reacias a aceptar las ofertas y en muchos casos optaron por ignorarlas. Los oficiales militares eran tradicionalmente escépticos acerca de la utilidad de la investigación científica, especialmente si la investigación era llevada a cabo por científicos civiles. En Alemania y en el Imperio austrohúngaro, los científicos más jóvenes se consideraban soldados ordinarios, que servían en los campos de batalla como cualquier otro grupo de reclutas. En la primera fase de la guerra, no existían planes de emplear físicos u otros científicos en proyectos de guerra o aprovechar sus conocimientos de otra manera; esto sólo vino después, y aunque el reconocimiento de la importancia de la ciencia se incrementó durante la guerra, permaneció a un nivel limitado. El mayor y mejor conocido de los proyectos alemanes de guerra, el proyecto de guerra de gases químicos bajo la dirección de Fritz Haber, empleaba a varios físicos. Durante periodos de tiempo cortos o largos, James Franck, Otto Hahn, Erwin Madelung y Gustav Hertz trabajaron en el proyecto. Hahn experimentó con gases venenosos en el instituto Kaiser Wilhem en Berlín y desarrolló nuevos gases en la Industria Química Bayer en Leverkusen. Otra institución militar donde los físicos encontraron empleo fue la Comisión de Pruebas de Artillería (Artillerie-Prüfungs-Kommision, o APK) en Berlín; allí se investigaron distintos métodos de medir distancias: ópticos, acústicos, sismométricos y electromagnéticos. Max Born pasó parte de la guerra trabajando en APK, y también Alfred Landé, Fritz Reiche, Ferdinand Kurlbaum y Rudolf Ladenburg. La idea de utilizar medidas sonoras como método de determinar la posición de la artillería enemiga provino de Ladenburg quien, como capitán de caballería, logró persuadir a los militares para que organizaran un grupo de científicos que trabajaran con el problema. Entre otras cosas, Born estudió la influencia del cambio del viento con la altitud en la propagación del sonido mediante métodos de dinámica hamiltoniana. «Soy de la opinión de que fue un buen trabajo de matemática aplicada», recordó Born (Born 1978, p. 171).

Otros físicos alemanes aún trabajaban con problemas de telecomunicaciones, un campo que al principio era despreciado por el ejército alemán. Max Wien, el catedrático de física en la Universidad de Jena, organizó una unidad de físicos e ingenieros para trabajar en el uso de la comunicación sin cable en aviones. Sommerfeld investigó durante un tiempo sobre la posibilidad de escuchar comunicaciones telefónicas enemigas detectando débiles «corrientes de tierra» que se propagarían por el suelo. Instrumentos de escucha amplificados por válvulas basados en la investigación de Sommerfeld eran capaces de detectar señales a más de un kilómetro de una línea y probaron ser de considerable valor para el ejército alemán. (La física técnica no era un campo extraño para el teórico Sommerfeld, que había publicado anteriormente sobre problemas electrotécnicos y la teoría hidrodinámica de la lubricación.)

En Inglaterra, la movilización de la ciencia y la tecnología comenzó en el verano de 1915 con el Committee of the Privy Council for Scientific and Industrial Research que, al año siguiente, pasó a ser el Department for Scientific and Industrial Research (DSIR). El objetivo del DSIR era promover, financiar y coordinar la investigación científica y técnica de significación industrial y militar. Aunque estaba enfocada a la producción de materiales útiles, como productos químicos y vidrio óptico, el DSIR reconocía que el objetivo requería inversiones en ciencia pura. Como *Nature* apuntó en 1916, «el abandono de la ciencia pura podría compararse con el arado y estercolado de un terreno, seguidos de la omisión de arar y sembrar». El Laboratorio Nacional Físico, que desde 1902 había operado bajo la supervisión de la Royal Society, fue transferido al nuevo departamento en 1918. Al estallar la guerra, el laboratorio tenía 187 empleados. Durante los cuatro años siguientes, se dio alta prioridad al trabajo con fines militares y, a finales de 1918, el número de personas que trabajaban en el laboratorio se había incrementado a unos 550. El DSIR fue el más importante de los primeros organismos británicos de política científica, y sería el soporte esencial para la física y las demás ciencias durante las siguientes tres o cuatro décadas. Como sus contrapartes alemanes, los físicos británicos se ocupaban de comprobar y de desarrollar métodos de medidas de distancia. William H. Bragg y otros físicos investigaron métodos sonoros para localizar armamento alemán tras las líneas de trincheras. En el Departamento de Invenciones de Municiones, Ralph Fowler y el joven Edward Milne trabajaron con instrumentos ópticos diseñados para guiar el fuego antiaéreo.

Un problema si cabe de mayor importancia para los británicos era la amenaza de los submarinos alemanes. El trabajo en esta área tuvo lugar en el Departamento de Invenciones e Investigación (BIR) de la Marina Real, que se creó en el verano de 1915. Rutherford era uno de los físicos que se ocupaban de desarrollar métodos de detección de los temidos submarinos. Hizo que parte de su laboratorio de Manchester se convirtiese en un gran tanque de agua, donde desarrolló numerosos experimentos. De acuerdo con el biógrafo de Rutherford, sus informes sistemáticos al almirantazgo no sólo marcan el nacimiento de la ciencia militar submarina, sino que, «lo que Rutherford dijo sobre caza de submarinos en 1915 sigue siendo cierto en los años ochenta» (Wilson 1983, p. 348). Rutherford aconsejó que la detección acústica era la única manera

práctica de localizar submarinos, y él y otros físicos trabajaron duramente para desarrollar eficaces «hidrófonos» y otros aparatos de escucha. Su trabajo también incluía investigación sobre la utilización de cuarzo piezoeléctrico para la producción de sonido de alta frecuencia para la detección de submarinos. Esta línea de investigación, que fue reproducida de manera independiente por Paul Langevin en Francia, se transformó más tarde en la tecnología del sónar. A veces se considera que la invención del sónar se remonta al trabajo durante la guerra de Langevin y Rutherford.

Como en el caso de Inglaterra, la guerra indujo a que el gobierno estadounidense comenzara un plan científico. En junio de 1916 se estableció un Consejo de Investigación Nacional (NRC) con el propósito de organizar y promover la investigación para la «seguridad y el bienestar nacionales». Como en Inglaterra, se dio alta prioridad a la detección de submarinos y se escogió a Millikan como presidente del comité del NRC contra submarinos. El trabajo de los estadounidenses en esta área estuvo, hasta cierto punto, coordinado con el trabajo considerablemente más avanzado de sus aliados en Francia e Inglaterra. En junio de 1917 una misión franco-británica, que incluía a Rutherford, visitó a sus colegas de Estados Unidos. Mientras que la investigación estadounidense tanto en detección submarina como en artillería era inferior a la de sus aliados, en el campo de las comunicaciones era superior. Cuando se declaró la guerra en abril de 1917, el ejército de Estados Unidos comisionó a John Carty de AT&T y a un número selecto de otros científicos e ingenieros como oficiales en los Cuerpos de Señales. Carty organizó una División de Ciencia e Investigación, encabezada por Milligan, que incluía científicos e ingenieros de universidades y empresas privadas. En unos pocos meses, AT&T proporcionó 4.500 ingenieros y operadores organizados en 14 batallones, triplicando por tanto al personal de los cuerpos de señales. La eficacia de los sistemas de comunicaciones del ejército de Estados Unidos, tanto por cable como inalámbricos, dependía de los desarrollos en tecnología de válvulas de vacío realizados por Oliver Buckley, el físico de AT&T que estaba encargado del laboratorio de los cuerpos de señales en París.

En comparación con la Segunda Guerra Mundial –«la guerra de los físicos»– los físicos tuvieron un papel relativamente secundario en la Primera Guerra Mundial, que se denomina con justicia «la guerra de los químicos». Sus contribuciones no fueron de ningún modo de importancia decisiva y el tipo de física que se utilizó en el esfuerzo bélico tenía poca conexión con la investigación de vanguardia en las ciencias físicas. Por otro lado, era la primera vez en la historia que los físicos se hacían visibles y útiles en un conflicto militar importante. Cuando terminó la guerra, estaba claro que la física podía ser de importancia considerable para los militares y que el apoyo del gobierno era necesario para que la física se pudiera aplicar con propósitos de seguridad. Aunque la «física militar» se estableció por lo tanto en 1918, nadie podría haberse imaginado el papel crucial que los físicos desempeñarían en la guerra poco más de dos décadas después, y aun menos podrían haberse imaginado la militarización de la física que sería un aspecto tan pronunciado en el mundo de la física dominado por Estados Unidos en los años cincuenta (véase capítulo 20).

Segunda parte:
de la revolución a la consolidación

CAPÍTULO 10

Ciencia y política en la República de Weimar

Alemania fue la principal nación científica del mundo durante la primera parte del siglo XX y en muchos aspectos servía como modelo para otros países. Fue en Alemania donde muchas de las grandes innovaciones en física y las otras ciencias exactas tuvieron su origen. El año 1918 marcó un hito en la historia alemana y mundial: debido a su derrota en la guerra y al humillante Tratado de Versalles apareció el malestar social en el país, falta de alimentos, asesinatos políticos, una drástica caída en la economía del país y una hiperinflación que duró hasta 1923, cuando una barra de pan de centeno costaba medio billón de marcos. Alemania sufría un severo estado de crisis, económica, política y espiritualmente. Sin embargo, en contra de cualquier expectativa, a la física alemana le fue notablemente bien durante estos años difíciles y consiguió mantener su elevada posición internacional. En algunas de las nuevas y excitantes áreas, como teoría atómica y cuántica, los físicos alemanes marcaron la agenda internacional. Las semillas de la mecánica cuántica se sembraron durante los primeros años de la república de Weimar, a pesar de todas sus dificultades y de las miserables condiciones de vida.

Política científica y apoyo financiero

La comunidad científica alemana permaneció intacta tras la guerra, pero era una comunidad pobre y en desesperada búsqueda de dinero. No sólo era Alemania una nación relativamente pobre durante la posguerra, sino que sus científicos fueron también excluidos de colaboraciones internacionales. La falta de moneda extranjera se añadía a los problemas de los alemanes, porque hacía casi imposible la compra de literatura e instrumental extranjeros. Las universidades presenciaron un drástico incremento en el número de estudiantes, muchos de ellos antiguos combatientes, para los cuales no tenían espacio, profesores ni dinero. Los presupuestos de los institutos estaban muy por detrás de sus niveles de antes de la guerra y también los salarios del personal científico; debido a la inflación, los ahorros podían perder su valor de un día para otro. Otto

Hahn recordaba cómo Max von Laue y él se tomaron unas vacaciones de una semana en el sur de Alemania en 1923: «Al final de aquel corto viaje, Max von Laue se percató que le faltaban un millón de marcos para pagar el billete de vuelta. Yo pude prestarle el dinero. En años posteriores, cuando el dinero había vuelto a tener su valor normal en Alemania, le solía recordar de vez en cuando que todavía me debía un millón. Al final me pasó un billete de cincuenta mil millones, diciendo que ahí estaba, junto con los intereses, simple y compuesto» (Hahn 1970, p. 137).

Los principales científicos alemanes se daban cuenta de que necesitaban legitimar sus ciencias de una nueva manera, tanto para satisfacerse como para atraer más convincentemente a potenciales patrocinadores del gobierno. Alemania había perdido la guerra, el káiser había huido, los buenos tiempos eran cosa del pasado. ¿Qué era lo que quedaba para poder aportar a la nación nuevo honor y dignidad? De acuerdo con muchos científicos (como es de esperar), la respuesta era la ciencia. En un comunicado a la Academia Prusiana de las Ciencias en noviembre de 1918, Max Planck lo dejó claro: «Si el enemigo ha sustraído de nuestra patria toda defensa y potencia, si nos han sobrevenido serias crisis internas y quizá nos esperan crisis todavía más serias, existe algo que ningún enemigo interno o extranjero ha podido sustraer aún: la posición que la ciencia alemana ocupa en el mundo. Además, es la misión de nuestra academia por encima de todo, como la institución científica del estado más distinguida, mantener esa posición y, si fuera necesario, defenderla con todos los medios disponibles» (Forman 1973, p. 163). Era un tema que se oía a menudo en la joven República de Weimar. Planck, que por aquel entonces surgía como un portavoz oficioso de la ciencia alemana, repetía el mensaje en un artículo de prensa de 1919: «Mientras que la ciencia alemana pueda continuar como antiguamente, es impensable que Alemania pueda apartarse del grupo de las naciones civilizadas» (Heilbron 1986, p. 88). La ciencia debería fomentarse, decía Planck, principalmente no porque condujera al progreso tecnológico y económico (aunque esto también era un motivo), sino porque era el principal bien cultural alemán. La ciencia debía verse como un portador de cultura, un *Kulturträger* en alemán. Era algo de lo que el país debía estar orgulloso, que podía servir como sustituto para el poder político y militar que, por desgracia, ya no existía. La ciencia se veía como un medio para la restauración de la dignidad nacional y los famosos científicos alemanes se convirtieron en instrumentos de las políticas culturales nacional e internacional, a la par de los poetas, compositores y artistas del país.

Recurrir a los valores culturales y políticos de la ciencia no era la sólo retórica de unos pocos científicos buscando financiación. Sorprendentemente, en vista de la tradicional legitimación utilitaria de la ciencia, estaba en consonancia con el punto de vista de muchos políticos y académicos de humanidades, que favorecían una actitud antiutilitarista y antimaterialista ante la ciencia. La posesión más preciosa en la lucha por el reconocimiento cultural internacional era quizás Einstein, que, como alemán (en cierto sentido), podía ser utilizado con propósitos propagandísiticos siempre que se quedara en Alemania. Planck, entre otros, temía que Einstein dejara Alemania, lo cual hubiera significado una pérdida no sólo para la ciencia alemana, sino también para la

política cultural alemana. El asunto se delineó con claridad en un informe del 2 de septiembre de 1920 del consejero alemán de la Embajada en Londres al ministro de Exteriores en Berlín. Tras mencionar rumores en los periódicos británicos de que Einstein podría abandonar Alemania e irse a América, el encargado de negocios apuntó, «especialmente en estos momentos, el profesor Einstein cuenta como un factor cultural de primera magnitud para Alemania, ya que su nombre es ampliamente conocido. No deberíamos provocar que un hombre así se vaya de Alemania, le podríamos usar para una efectiva propaganda de *Kultur*. Si el profesor Einstein realmente estuviera intentando abandonar Alemania, yo vería deseable en interés de la reputación alemana en el extranjero que se pudiera convencer al famoso sabio de que se quedara en Alemania». Este informe era sólo uno de muchos. Cada vez que Einstein viajaba al extranjero a impartir clases, un funcionario de la embajada o del consulado alemán enviaba informes secretos a Berlín. Los informes, de París, Copenhague, Tokio, Madrid, Oslo, Chicago y otros lugares, prestaban especial atención a cómo la prensa extranjera conectaba al famoso físico con Alemania. Un diplomático alemán en Montevideo informaba con satisfacción el 4 de julio de 1925 que ya que Einstein «ha sido celebrado todo el rato como un "sabio alemán" (su ciudadanía suiza, que también posee, apenas se mencionaba), su visita ha sido extremadamente valiosa para la causa alemana» (Kirsten y Treder 1979, pp. 207 y 234).

En la Alemania wilhelmiana, la ciencia académica recibía financiación principalmente de los estados alemanes (a los cuales pertenecían las universidades) pero no del gobierno federal de Berlín. En las precarias condiciones existentes después de 1918, las organizaciones científicas alemanas tenían que encontrar nuevas fuentes de financiación para evitar la quiebra. La más importante de las nuevas agencias centrales científico-políticas era la Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft, fundada en 1920. Esta organización representaba varias instituciones científicas alemanas, incluyendo a la Kaiser-Wilhelm Gesellschaft, las universidades y escuelas técnicas, las academias de ciencias, y la Sociedad de Científicos y Médicos Alemanes. La principal actividad de la Notgemeinschaft era la de recaudar y proporcionar dinero para la investigación de todo tipo: en las ciencias naturales, en ingeniería, en ciencias sociales y en humanidades. La Notgemeinschaft financiaba a científicos individuales y a proyectos de investigación a partir de sus méritos y las becas se proporcionaban independientemente de la universidad del destinatario. Las solicitudes eran juzgadas por una comisión de expertos, sin interferencia del gobierno central. De 1922 a 1934, Max von Laue era el director del comité de física, un puesto influyente en la política científica alemana. Con diferencia, la mayor parte de los recursos de la Notgemeinschaft provenían del gobierno de Berlín, pero existían también sustanciosos donativos del extranjero, incluyendo importantes contribuciones de la General Electric y de la Fundación Rockefeller en Estados Unidos. Sólo una parte menor provenía de la industria alemana, que prefería canalizar su apoyo a la competidora sociedad Helmholtz o a proyectos científicos individuales de naturaleza más técnica.

La Notgemeinschaft estaba controlada por científicos de Berlín y, en lo tocante a la física, favorecía el tipo de física teórica pura que Planck consideraba culturalmente (y por tanto, a su entender, políticamente) importante. Como miembro del comité ejecutivo de la Notgemeinschaft, Planck hizo posible que los teóricos atómicos en Gotinga y Múnich recibieran fondos suficientes. En general, sin embargo, una gran parte de las becas de investigación se concedieron a físicos de Berlín. Por ejemplo, durante 1924-1926, los físicos de Berlín recibieron aproximadamente la mitad de las becas, un hecho que enfureció a muchos físicos conservadores de fuera de la capital, que acusaron a la Notgemeinschaft de favoritismo con respecto a Berlín. A lo largo de los años veinte, Johannes Stark y otros físicos conservadores intentaron ganar influencia en la Notgemeinschaft, pero fueron resueltamente repelidos por Laue y Planck. A pesar de la predilección de la Notgemeinschaft por la física teórica moderna, había suficiente dinero y magnanimidad para financiar también a antirrelativistas como Stark, Lenard y Rudolf Tomaschek.

El comité de Electrofísica, un subcomité de la Notgemeinschaft basado en las donaciones de la General Electric, fue esencial para la física atómica alemana. De 140 solicitudes de beca que recibió entre 1923 y 1925, aprobó 71, la mayoría de ellas en física atómica y cuántica. El dinero era donado ostensiblemente para ayudar a la física técnica y experimental, pero los miembros del comité (que incluían a Planck como director) a menudo querían utilizarlo para teoría atómica. «Claro que el dinero está designado como "en especial para investigación experimental"», escribió Planck a Sommerfeld en 1923, «pero tu proyecto puede presentarse como la elaboración de una investigación experimental. Lo principal por supuesto es tu nombre» (Heilbrom 1986, p. 92). En física, como en otros campos, es bueno tener un nombre y tener amigos. La mecánica cuántica habría llegado sin duda, con o sin apoyo de la Notgemeinschaft. Pero Heisenberg y Born estuvieron financiados con dinero de la Notgemeinschaft, y es compresible que el comité de Electrofísica se congratulara en 1926 cuando la mecánica cuántica demostró su valor (en todos los sentidos). El dinero y la filosofía de la Notgemeinschaft habían sido rentables con creces: «Como es bien sabido, la mecánica cuántica ocupa el centro de la atención entre los círculos de física de todas las naciones. El trabajo de Heisenberg y Born, que el comité de Electrofísica ha financiado y sin el cual el trabajo es probable que no se hubiera realizado en Alemania sino en otra parte, ha mostrado la utilidad del comité de Electrofísica en el desarrollo de la física en Alemania» (Cassidy 1992, p. 160).

Durante 1921-1925, la Notgemeinschaft financió proyectos en ciencias físicas con becas anuales de unos 100.000 marcos de oro, que era una suma muy sustancial; además, patrocinó un pequeño número de becas de investigación. La importancia de la organización para la física alemana se refleja en las publicaciones de investigación. Se ha estimado que al menos una cuarta parte de las 8.000 publicaciones aparecidas en las tres principales revistas de física alemanas entre 1923 y 1938 se basaban en investigación financiada total o parcialmente por la Notgemeinschaft. En un tono menos estadístico, considérese el caso de Werner Heisenberg, un prometedor estudiante de física de veintiún años en 1923. Heisenberg era la clase de físico que la Notgemeinschaft que-

ría mantener en el campo y recibió financiación de la organización en 1923-1925, aunque no la suficiente para vivir de ella. Su profesor en Gotinga, Max Born, proporcionó ayuda adicional. Como muchos otros profesores, Born tenía amigos entre los industriales alemanes y filántropos extranjeros, alguno de los cuales ayudaban con la financiación de su instituto. Born recibió generosas contribuciones de un financiero de Nueva York, Henry Goldman, y utilizó el dinero para ayudar a sus estudiantes y asistentes, entre ellos Heisenberg. Hay muchas maneras de sobrevivir durante los años difíciles, algunas más regulares que otras.

El Physikalisch-Technische Reichsanstalt fue una de las organizaciones centrales de física que sobrevivieron a la guerra, pero no recuperó su anterior gloria y posición como uno de los principales institutos mundiales de física pura. Por el contrario, cuando el Reichsanstalt se orientó todavía más hacia las pruebas y la física técnica, se deterioró científicamente. Poco después de que Friedrich Paschen se convirtiera en director del Reichsanstalt en 1924, se quejaba a Sommerfeld de que «el trabajo propiamente científico se ha acabado aquí». Continuaba, «el instituto se ha vuelto más y más técnico. La investigación puramente científica está en retirada. La misma actitud de los funcionarios científicos es muy técnica. En la mayoría de ellos, la física moderna no ha dejado huella» (Kragh 1985, p. 110).

Relaciones internacionales

En un congreso de medicina en Copenhague en 1884, Louis Pasteur confirmó la neutralidad e internacionalidad de la ciencia. «La ciencia no tiene país de origen», dijo, pero continuó después, «incluso si la ciencia no tiene ningún país de origen, el científico debería ocuparse en particular con lo que proporciona honor a su país. En cada gran científico siempre encontrareis a un gran patriota» (Kragh 1980a, p. 293). La problemática ambivalencia entre patriotismo e internacionalismo científico fue totalmente evidente durante y después de la Primera Guerra Mundial, cuando resultó que el patriotismo era el más fuerte de los dos ideales (véase también el capítulo 9). En una carta a George Hale en 1917, el físico e inventor estadounidense Michael Pupin escribió, «la ciencia es la más alta expresión de una civilización. La ciencia aliada es, por lo tanto, radicalmente distinta de la ciencia teutónica [...] vemos hoy más claramente que nunca, que la ciencia no puede ser disociada de los distintos estados de ánimo y sentimientos del hombre [...] Creo que los hombres científicos son primero hombres y después científicos» (Forman 1973, p. 158).

Durante la última fase de la guerra, científicos franceses, británicos y estadounidenses discutieron la estructura de una nueva organización científica internacional que reemplazaría a la Academia Internacional de las Ciencias. Las principales figuras en estas negociaciones eran el astrónomo norteamericano George Hale, el físico británico (nacido en Alemania) Arthur Schuster y el matemático francés Charles Émile Picard. El resultado fue la formación, en verano de 1919, del International Research Council (IRC), cuyos miembros al principio podían proceder tan sólo de las potencias

aliadas y las naciones asociadas con ellas o que se habían opuesto a los alemanes. Los países miembros eran: Francia, Inglaterra, Estados Unidos, Bélgica, Italia, Australia, Canadá, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Japón, Brasil, Grecia, Polonia, Portugal, Rumanía y Serbia; una selección sin duda política y no basada en el mérito científico. La membresía de las uniones científicas bajo el IRC, como la planeada International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) también debía ser de estos países. La IUPAP se formó en 1922, con representantes de trece naciones y William H. Bragg como primer presidente. Le siguió Millikan y, durante los difíciles años de la guerra, Manne Siegbahn, de Suecia. La IUPAP no fue muy activa hasta 1931, cuando se reorganizó en conexión con el cambio del IRC al ICSU, International Council of Scientific Unions (Consejo Internacional de Uniones Científicas). Por aquel entonces, la IUPAP era una de las ocho organizaciones científicas bajo el consejo, las otras eran de astronomía, geodesia y geofísica, química, matemáticas, ciencia de radio, biología y geografía.

Debido al odio y a la sospecha suscitada por la terrible guerra, Alemania, Austria, Hungría y Bulgaria quedaron apartadas del IRC, e incluso los países neutrales quedaron fuera. El núcleo duro temía que los países neutrales pudieran alterar el equilibrio de poder en el IRC y votar a favor de la admisión de las antiguas potencias centrales. Sólo se admitieron algunos países neutrales en 1922, entre ellos Holanda y los países escandinavos. Las sospechas francesas parecieron justificadas, ya que fueron estos países los que primero abogaron por la aceptación de las potencias centrales. En 1925 Lorentz sugirió, en nombre de las delegaciones holandesa, noruega y danesa, que se anulara la política de exclusión. Aunque la resolución recibió apoyo de Gran Bretaña y los Estados Unidos, y también recibió diez votos de dieciséis en la Asamblea General, no consiguió la mayoría necesaria de dos tercios de todas las naciones. (Por aquel entonces, el IRC incluía veintinueve naciones, de las cuales sólo dieciséis estaban presentes, así que ni siquiera un voto unánime hubiese cambiado los estatutos.) El viento cambió al año siguiente, después de que el Tratado de Locarno asegurara una atmósfera política más benigna en Europa. Entonces, los científicos principales del IRC, incluyendo a Schuster, Hale y Picard (que era el presidente), aceptaron la admisión alemana y se enviaron invitaciones a Alemania y a los países anteriormente enemigos. Sin embargo, cuando la invitación por fin llegó, fue rechazada por los científicos alemanes y austriacos. El resultado fue que los dos países quedaron fuera del cuerpo oficial de ciencia internacional hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Hungría ingresó en el IRC en 1927 y Bulgaria en 1934.

La exclusión de Alemania del IRC fue sólo una de las maneras con las que los ganadores de la guerra intentaban aislar y disminuir la importancia de la ciencia alemana. Desde 1919 hasta aproximadamente 1928, la ciencia alemana sufrió un boicot internacional, en el sentido de que no se permitió a los científicos alemanes asistir a muchas conferencias internacionales. Durante los primeros años, el boicot fue bastante efectivo, con la exclusión de los alemanes de la mayor parte de las conferencias internacionales; de 275 conferencias científicas internacionales entre 1919 y 1925, 165 no tuvieron participación alemana (véase figura 10.1). Muchos institutos, oficinas e insti-

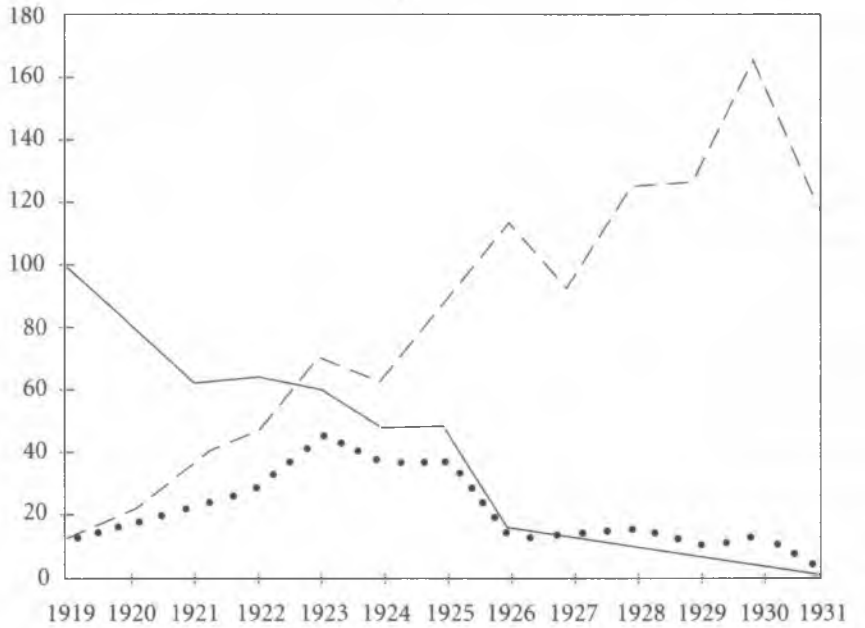


Gráfico 10.1. Número de congresos científicos internacionales (línea discontinua) y número de aquéllos de los cuales Alemania fue excluida (línea de puntos). La línea continua muestra el porcentaje de congresos que excluyeron la participación alemana. *Fuente:* Redibujado a partir de Schröder-Gudehus 1966.

tuciones internacionales abandonaron el territorio alemán. En 1914, había 60 organizaciones de este tipo, de las cuales 14 estaban en Alemania y 18 en Francia; en 1923, el número se había incrementado a 85, ahora con 37 en Francia y sólo 6 en Alemania. Estas organizaciones internacionales creían que no sólo debía ser boicoteada la ciencia alemana, sino también el idioma y las publicaciones científicas en alemán. En la mayoría de las conferencias internacionales, no se aceptaba el alemán como idioma oficial. Después de todo, como se expresaba en *Science* en 1920, «el alemán es, sin duda, un lenguaje bárbaro que acaba de surgir de la etapa del primitivo carácter gótico y [...] sería provechoso para la ciencia tratarlo de esta manera a partir de la fecha del 1 de agosto de 1914».

Como se pretendía, el boicot sí causó alguna inconveniencia a la ciencia alemana, aunque el daño fuera más psicológico que material. Probablemente hizo más daño a las naciones que boicoteaban, que tuvieron que apañárselas sin alemanes en conferencias dedicadas a temas en los cuales los científicos alemanes eran los expertos indiscutibles. Los congresos de Solvay de 1921 y 1923, sobre «átomos y electrones» y «conductividad eléctrica de metales», respectivamente, no incluyeron a físicos alemanes, lo cual claramente devaluó el valor de estos encuentros. El boicot nunca fue completo, ya que no lo apoyaron ni los Países Bajos ni Escandinavia. En 1919 la Academia Sueca de

Ciencias decidió otorgar el premio Nobel de Física a Planck y Stark, y el premio en Química a Fritz Haber. Se consideró en general ofensivo que los premios recayeran en tres científicos alemanes; el premio a Haber fue especialmente controvertido por su participación en la industria bélica alemana de gases. Desde la perspectiva de Francia, los suecos habían hecho una elección política en un esfuerzo de rehabilitar la ciencia alemana. Haber, que compartía el punto de vista de Planck y muchos otros científicos alemanes sobre la ciencia como *Macht-Ersatz*, parece haber estado de acuerdo. Planck consideraba el premio «un tributo a los logros de la ciencia alemana por parte de colegas profesionales en Suecia», como escribió a la Academia Sueca de Ciencias (Widmalm 1995, p. 351).

Einstein era uno de los pocos científicos alemanes que era bienvenido en las conferencias internacionales. No sólo era el científico más famoso del mundo, sino también un pacifista y demócrata, y no se le consideraba un «verdadero» alemán. (Por aquel entonces, Einstein ostentaba doble ciudadanía, suiza y alemana.) Pero incluso un judío pacifista suizo-alemán podía resultar demasiado controvertido a principios de los años veinte. Cuando Einstein accedió a una invitación de Paul Langevin para hablar en París en la primavera de 1922, fue conducido a la capital francesa en secreto para evitar manifestaciones. Además, tuvo que cancelar un seminario ante la muy digna Academia de las Ciencias porque treinta miembros tenían planeado abandonar el auditorio tan pronto como entrara Einstein. Para ellos, era lo bastante alemán para no ser grato.

Los intentos de utilizar a Einstein políticamente contra sus colegas alemanes no tuvieron más éxito que los intentos alemanes de utilizarlo para sus propios fines políticos. Por ejemplo, los organizadores del congreso de Solvay de 1923 querían que Einstein participara, pero Einstein rehusó cuando se dio cuenta de que otros científicos alemanes no estaban invitados. Como escribió a Lorentz, «[Sommerfeld] es de la opinión de que no está bien que yo participe en el congreso de Solvay porque mis colegas alemanes están excluidos. En mi opinión no está bien introducir la política en asuntos científicos, y los individuos no deberían considerarse responsables por el gobierno del país al cual da la casualidad que pertenecen. Si tomara parte en el congreso, me convertiría por implicación en cómplice de una acción que de manera muy fuerte considero inquietantemente injusta» (Mehra 1975, p. xxiii). En un artículo titulado «Todo sobre la relatividad» de la misma época, la popular revista inglesa *Vanity Fair* escribía, superficialmente: «Y, en todo caso, Einstein es un alemán, y todo este asunto es sin duda un plan alemán para retomar el control del comercio de tinte de anilinas [...] Contesta a una pregunta con otra. Pero aquí es cuando entra lo alemán del asunto. Lástima que su descubrimiento no se deba a un representante de uno de los amistosos aliados (pregunta para una lectura colateral: nombre cinco aliados que sean amistosos en estos momentos).» (Hentschel 1990, p. 125). El comentario de *Vanity Fair* era irónico, pero la ironía apuntaba a un problema real en el contexto político de la ciencia de esa época.

Otro caso ilustra el mismo concepto de distinto modo. En enero de 1923, el húngaro Georfe Hevesy y el holandés Dirk Coster anunciaron que habían descubierto el

elemento número 72 mientras trabajaban en el instituto de Niels Bohr en Copenhague. El anuncio del descubrimiento del hafnio (Hf), como llamaron al elemento, causó una importante controversia sobre prioridades con los científicos franceses, que aducían que ya habían descubierto el elemento, al que llamaron celtio (Ct). El hecho de que la controversia empezara a principios de 1923, un momento en el que las relaciones francoalemanas estaban al borde de la ruptura como resultado de la ocupación francobelga de la región del Ruhr, le otorgó un sabor distintivo. El descubrimiento del hafnio, y especialmente el consiguiente descrédito infligido a la ciencia francesa, se consideró entre los científicos aliados militantes una conspiración contra la *gloire* francesa, un siniestro intento de proporcionar a Alemania una venganza intelectual de su derrota militar. Cuando Hevesy, siguiendo el consejo de Rutherford, envió un artículo sobre el hafnio a la revista *Chemical News*, profrancesa y proceltio, su editor, W. P. Wynne, respondió: «Nos adherimos a la palabra original, celtio, asignada a él por Urbain como representante de la gran nación francesa, que fue leal a nosotros durante la totalidad de la guerra. No aceptamos el nombre otorgado por los daneses, que se limitaron a embolsarse los despojos tras la guerra» (Kragh 1980a, p. 294). Aunque ningún científico alemán había contribuido al descubrimiento del hafnio, fue asociado de todos modos con la «ciencia teutónica». Hevesy era húngaro, por tanto un anterior enemigo, y Coster era un holandés que había pasado la mayor parte de su carrera científica en Suecia y Dinamarca, países a los que se acusaba de ser proalemanes. Aunque el estatus de Niels Bohr en el mundo académico impedía cualquier crítica directa a sus actividades, a muchos partidarios radicales de la línea de boicot les pareció demasiado blando con los alemanes. Durante la guerra, y también después, Bohr había mantenido relaciones normales y amistosas con sus colegas alemanes, y durante el cenit del boicot, fueron frecuentes las visitas entre Copenhague y Alemania. Bohr dio clases en Alemania, participó en conferencias no autorizadas, y fue el anfitrión de muchos físicos alemanes; siempre fue cuidadoso en reconocer los resultados de sus colegas alemanes; y publicó muchos de sus más importantes artículos en revistas alemanas, ignorando así los esfuerzos de aislar al alemán como un lenguaje indigno para la comunicación científica. Todo esto hacía que Bohr y la física de Copenhague parecieran proalemanes en algunos círculos e incrementó el vago sentimiento de teutonismo que rodeaba al hafnio. El asunto era delicado para el Comité Internacional de Elementos Químicos, una rama del IRC sin representantes de países neutrales. El celtio carecía de credibilidad científica, pero por razones políticas el comité encontró imposible sancionar al hafnio. Sólo se aceptó oficialmente en 1930.

Alemania no fue el único país donde la ciencia sufría por culpa de la guerra. Las condiciones materiales eran incluso peores en la joven Unión Soviética, que quedó aislada de otros países de manera mucho más efectiva que Alemania. El sufrimiento y la muerte por malnutrición, tifus y la guerra civil no distinguía entre científicos y no científicos. Las condiciones de penalidad física durante los terribles años entre 1918 y 1922 hacían muy difícil que los físicos continuaran sus actividades investigadoras y construyeran marcos institucionales. La Asociación Rusa de Físicos se fundó en 1919,

principalmente gracias a los esfuerzos de Orest Khvol'son y Abram Ioffe, pero la organización resultó inadecuada para la tarea de normalización de la física. Durante un periodo, la falta de papel impedía o retrasaba mucho las publicaciones científicas. Por ejemplo, el primer libro de texto ruso sobre relatividad general, completado en 1922 por Alexander Friedmann y Vsevelod Frederiks, apareció por primera vez en 1924 por la escasez de papel. La revista de física soviética más importante (*ZhRFKhO*) apareció de manera intermitente entre 1918 y 1923, sin aparecer en 1920 ni en 1921. Los intentos de los físicos rusos de reconstruir su disciplina y romper su aislamiento de los países occidentales consiguió sólo un éxito parcial a partir de 1922, aproximadamente. Ese año, la Unión Soviética estableció relaciones diplomáticas con Alemania y, como resultado, los contactos entre físicos alemanes y rusos se incrementaron. Ioffe, fundador del Instituto Físico-Técnico de Leningrado, fue a Berlín a encargar los libros científicos, las suscripciones a revistas y los instrumentos que tanto se necesitaban. Él y otros físicos alemanes fueron recibidos con gran simpatía por sus colegas alemanes, que estaban deseosos de establecer conexiones profesionales entre los países parias, a pesar de sus diferencias políticas. En 1922 la Sociedad Alemana de Física eligió al físico de Leningrado Khvol'son como su único miembro honorario. A partir de 1925 aproximadamente, los contactos con el Oeste se incrementaron aun más y muchos físicos soviéticos visitaron Alemania y otros países occidentales, incluyendo Estados Unidos. Los físicos soviéticos estaban deseosos de publicar en revistas occidentales y escogieron a la alemana *Zeitschrift für Physik* como su revista favorita. A finales de los años veinte, más del 12 por 100 de los artículos en *Zeitschrift* estaban escritos por rusos, que contribuyeron un total de 592 artículos entre 1920 y 1936. Un tercio de los artículos estaban firmados por físicos del Instituto Físico-Técnico de Leningrado, el instituto de física más importante de la Unión Soviética.

La comunidad de la física

Como se ha indicado previamente, a principios de los años veinte la comunidad física alemana estaba dividida en cuestiones de ciencia, política e ideología. El amplio grupo de derechas incluía a fascistas como Stark y Lenard, además de físicos menos ideologizados como Wilhelm Wien y Otto Lummer. Los físicos de derechas compartían básicamente las mismas ideas políticas, incluyendo el chovinismo, el ultraconservadurismo, y oposición a la república de Weimar. El antisemitismo también era común a la mayoría de ellos. En 1922, cuando Paschen propuso a Alfred Landé como profesor asociado en Tubinga, un bastión conservador, Paschen notó que sus colegas tenían prejuicios negativos no sólo porque Landé fuera un teórico atómico «progresista», sino también porque era judío. (Estos incidentes, y el antisemitismo en general, no eran exclusivos de Alemania; la discriminación contra los judíos era común también en universidades de Estados Unidos y otros países.) Mientras que existía una facción derechista identificable en la física alemana, no existía una izquierdista con simpatías socialistas. Cuando mostraban algún interés en política, Paschen, Planck, Laue, Som-

merfeld y la mayor parte de los otros físicos progresistas establecidos, mantenían posturas conservadoras y antigubernamentales. Einstein y Born fueron excepciones a la regla. El conservadurismo burgués de la física ordinaria alemana sólo parecía liberal si se comparaba con las extremas posiciones de los derechistas. La generación joven de físicos que no habían servido en la guerra, incluyendo a Heisenberg, Jordan y Pauli, era sobre todo apolítica.

Los puntos de vista científicos de los físicos derechistas eran considerablemente paralelos a sus ideas políticas, ambos conservadores. Se mantuvieron leales a las posturas de la ciencia wilhelmiana y opuestos al *Zeitgeist* del periodo de Weimar. La mayor parte de los físicos derechistas se mantuvieron dentro de la cosmovisión del mecanicismo clásico y el electrodinamicismo, incluyendo nociones tales como el éter, el determinismo, la causalidad y la objetividad, que pasaron de moda a principios de los veinte. Sin embargo no estaban en completa falta de sintonía con el *Zeitgeist* de Weimar. Su predilección por la claridad de visualización *(Anschaulichkeit)* y la campaña por sustituir la perspicaz comprensión física en lugar del razonamiento matemático abstracto tenían el mismo valor para conservadores y «progresistas» que adaptaron sus puntos de vista al *Zeitgeist*. Las posturas de los derechistas se manifestaban en una disociación más o menos directa con respecto a las teorías cuánticas y de la relatividad y una preocupación por los experimentos a expensas de la teoría. No todos los experimentales eran conservadores, y no todo los teóricos eran «progresistas», pero existía una clara conexión en todo caso.

Hasta cierto punto, la división entre «progresistas» y «reaccionarios» reflejaba la tensión entre los poderosos físicos de Berlín y los institutos de física en las universidades provinciales. Sin embargo, la división no era marcada, como queda ilustrado por las importantes escuelas teóricas en Múnich y Gotinga. Era un estereotipo que no se ajustaba en absoluto a la mecánica cuántica, que tenía su origen fuera de Berlín (en Gotinga), y donde la mayoría de los físicos de Berlín estaba a favor de la versión conservadora de Schrödinger antes que de la versión radical de Heisenberg. A pesar de esto, con o sin justicia, para muchos físicos «Berlín» llegó a significar teoría abstracta, intelectualismo judío, arrogancia y mal gusto. La Sociedad Alemana de Física estaba dominada por físicos de Berlín y, por esta razón, se consideraba sospechosa en ciertos entornos. Einstein había sido presidente en 1916-1918 y fue sucedido por Sommerfeld después de que Max Wien, un experimental de la Universidad de Jena, declinara el cargo. En 1920 Stark organizó una organización rival, la Asociación de Profesores de Física Académica Alemana (Fachgemeinschaft Deutscher Hochschullehrer der Physik), pero la importancia de la nueva asociación era limitada; con el físico Wihelm Wien, de Múnich, como presidente de la Sociedad de Física, las acusaciones de «Berlinerei» eran menos convincentes.

Otra cuestión que dividía a los físicos alemanes involucraba la aplicación de la física a las necesidades técnicas industriales. Estas aplicaciones eran ajenas al antiutilitarismo del *Zeitgeist* de Weimar y, de hecho, la mayoría de los físicos convencionales respetaba poco la física técnica. Por otro lado, muchos físicos de derechas estaban deseosos de aplicar su ciencia a propósitos técnicos. Un alto porcentaje de físicos ale-

manes se había ocupado de física industrial o militar durante la guerra y sentía que su trabajo no recibía suficiente respeto en la Sociedad de Física. Cuando se fundó en 1919 la Sociedad Alemana para la Física Técnica, fue en parte como reacción contra lo que se percibía como un predominio de la teoría en la Sociedad Alemana de Física, dominada por Berlín. A lo largo de un año, el número de miembros de la nueva sociedad ascendió a 500, y entre 1925 y 1935 podía presumir de tener tantos miembros como la Sociedad de Física, unos 1.300 (véase figura 10.2). Gehrcke, el antirrelativista, era uno de los fundadores de la Sociedad para la Física Técnica y publicaba frecuentemente en su revista, el *Zeitschrift für technische Physik*.

Entre las prestigiosas revistas para publicaciones académicas, los físicos de derechas preferían los *Annalen der Physik*. Si no podían publicar en los *Annalen*, preferían publicar en revistas menos prestigiosas, o incluso oscuras, que en el *Zeitschrift für Physik*, la otra revista importante de física en Alemania. El *Zeitschrift*, fundado en 1920 por la Sociedad de Física y asociados con puntos de vista liberales y vanguardistas, era la revista favorita de la joven generación de físicos cuánticos pero sufría prácticamente un boicot por parte de los «reaccionarios», para los cuales significaba la decadencia y el dogmatismo de la física moderna. No resultó ser ninguna coincidencia que los artículos de Schrödinger sobre mecánica ondulatoria aparecieran en los *Annalen* y no en los

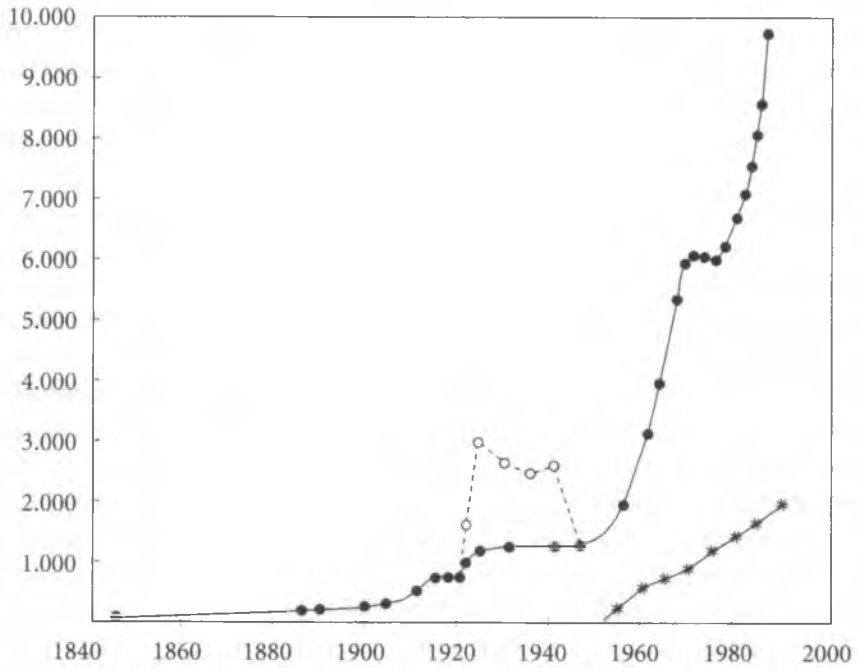


Gráfico 10.2. Miembros de la Sociedad Física Alemana desde su origen en 1845 hasta 1986. *Fuente:* Redibujado de Mayer-Kuckuk 1995, con permiso de Wiley-VCH Verlag GmbH.

Zeitschrift. Cuando se lanzó *Zeitschrift* en 1920, se planeaba que estuviera limitada a tres volúmenes anuales con un máximo de 1.440 páginas. Pero su éxito hizo que se expandiera por encima de las expectativas más optimistas. En 1924 incluyó diez volúmenes con un total de 4.015 páginas, y en 1929 sus siete gruesos volúmenes incluían 6.094 páginas. El lenguaje de la revista era el alemán y su éxito fue un gran argumento a favor de la importancia del alemán como lenguaje internacional de la física. En 1925, resultaba evidente que los esfuerzos franceses y británicos de limitar el alemán como lenguaje científico habían fracasado. Cuando un artículo en inglés, escrito por el físico indio R. N. Ghosh apareció en *Zeitschrift* en 1925, causó vehementes protestas de muchos físicos alemanes. El editor de la revista, el capaz Karl Scheel, se vio forzado a prometer que todos los artículos debían estar escritos en alemán. Para Lenard, que detestaba todo lo británico, la promesa llegó demasiado tarde. Abandonó la sociedad como protesta y desplegó un cartel en su instituto de física en Heidelberg con el mensaje: «Se prohíbe la entrada a los miembros de la que se hace llamar Sociedad Alemana de Física» (Beyerchen 1977, p. 98).

Zeitgeist y la cosmovisión física

Durante el decenio posterior a 1918, la física en Alemania se enfrentó no sólo a dificultades económicas, sino también a un medio intelectual distinto, que en muchos aspectos era hostil a los valores tradicionales de la física. A la física, y a la ciencia en general, se la acusaba cada vez más de ser desalmada, mecanicista y contraria a los valores humanos. Estas acusaciones no eran nuevas, ni en Alemania ni en otros lugares, pero empezaron a ser más frecuentes y a formularse con más autoridad en la República de Weimar. Las actitudes no científicas, o anticientíficas, eran populares en filosofía, psicología y sociología, y florecieron la astrología, la cabalística y otras variedades del misticismo. En 1927 Sommerfeld escribió: «La creencia en un orden mundial racional se ha visto sacudida por la manera en la que la guerra terminó y en que la paz fue dictada; en consecuencia, uno busca la salvación en un orden mundial irracional [...] por lo tanto nos vemos evidentemente confrontados de nuevo con una ola de irracionalidad y romanticismo como la que recorrió Europa hace cien años como una reacción contra el racionalismo del siglo XVIII y su tendencia a hacer la solución del enigma del universo quizá demasiado fácil» (Forman 1971, p. 13). Muchos físicos sentían que el *Zeitgeist* de la época era básicamente antagónico a su ciencia y que lo que contaba para el público educado eran ideas extrañas a la mente científica. Los autores y filósofos enfatizaban la *Lebenphilosophie* y la *Weltanschauung* más que los resultados científicos, los cuales identificaban con un materialismo trasnochado y una creencia injustificada en la causalidad y el conocimiento objetivo. El holismo, la intuición, el relativismo y el existencialismo estaban a la orden del día, no así el análisis matemático, los experimentos controlados y las explicaciones causales.

El programa *new age* se presentó de manera más influyente en el sombrío pero enormemente popular libro de Oswald Spengler *Der Untergang des Abendlandes (La*

decadencia de Occidente) que, de 1918 a 1926, fue impreso en unos 100.000 ejemplares. De acuerdo al amplio análisis de Spengler de los altibajos de las civilizaciones, la ciencia moderna estaba en un estado de profunda crisis, pero sólo porque no había conseguido adaptarse a la nueva cultura. Rechazando nociones anticuadas como causalidad y objetividad, Spengler sostenía que la ciencia era antropomorfa y simplemente una expresión de una cultura particular en un momento particular; la física era relativa a la cultura y la historia, y no existía física separada de, o independiente de, los entornos culturales locales; puede que el lector detecte una asociación con puntos de vista que fueron populares en las últimas décadas del siglo. Spengler, cuyo conocimiento de física contemporánea no era muy satisfactorio (pero pocos de sus lectores se habrían dado cuenta), creía que había llegado el momento para una nueva física que unificara pensamiento y espíritu. Sin embargo, la nueva física no podía construirse sobre la vieja; haría falta una civilización totalmente nueva: «La vasta y cada vez más gastada y carente de sentido tela tejida por la ciencia natural se desmorona. No era, después de todo, nada más que la estructura interna de la mente [...] pero hoy, en el ocaso de la época científica, en la etapa del escepticismo victorioso, las nubes se disuelven y el plácido paisaje de la mañana reaparece con toda su nitidez [...] agotada tras su lucha, la ciencia occidental vuelve a su hogar espiritual» (Forman 1971, p. 37). La filosofía de Spengler era quizá confusa y mal argumentada, pero era representativa del *Zeitgeist* y fue muy influyente en las discusiones culturales de la época. Prácticamente todos los alemanes educados, incluyendo los físicos, la conocían.

Dado que este clima antirracionalista y antipositivista dominó una gran parte de la cultura de Weimar, y dado que cuestionaba la legitimidad misma de la ciencia tradicional, era natural que los físicos se sintieran forzados a responder a las nuevas ideas. Y esto es lo que hicieron, generalmente no defendiendo los valores tradicionales de la ciencia sino, en muchos casos, cediendo ante el nuevo *Zeitgeist*. Un resultado de la adaptación, como se ha mencionado, fue que muchos físicos se abstuvieron de justificar su ciencia por su utilidad y en lugar de esto enfatizaron que la física es esencialmente cultura. Algunos físicos teóricos «capitularon» ante los nuevos puntos de vista de Spengler en el sentido de que asimilaron sus valores inconscientemente a lo que ellos percibían como el nuevo *Zeitgeist*. Por ejemplo, a principios de los años veinte varios físicos alemanes plantearon la cuestión de la crisis en la física y sostuvieron que el principio de causalidad no podía ya considerarse una base de las teorías físicas. Este repudio de la causalidad no estaba basado en desarrollos experimentales o teóricos específicos de la física.

La mecánica cuántica que apareció en 1925 era una teoría alemana que rompió con la causalidad microfísica. Es por tanto natural preguntar si existía una conexión causal entre las ideas generales sobre acausalidad antes de 1925 y la formación e interpretación de la mecánica cuántica. El historiador Paul Forman ha argumentado que los físicos alemanes, debido a la influencia del *Zeitgeist* de Weimar, estaban predispuestos a una mecánica cuántica acausal y estaban deseando una crisis en la teoría atómica semimecánica existente. Según Forman, la propia posibilidad de la crisis de la antigua teo-

ría cuántica dependía del medio intelectual de Weimar. Sin embargo, existen buenas razones para rechazar la sugerencia de una fuerte conexión entre las circunstancias socioideológicas de la joven República de Weimar y la introducción de una mecánica cuántica acausal. Es suficiente mencionar unas pocas razones:

1. Mientras que los físicos discutían a menudo la cuestión sobre la (a)causalidad y otros problemas relacionados del *Zeitgeist* en seminarios y artículos dirigidos a audiencias generales, estos temas casi nunca se mencionaban en artículos científicos o conferencias ante un público científico.
2. Hasta donde los físicos se adaptaron al *Zeitgeist*, la adaptación se refería a los valores de la ciencia, no a su contenido.
3. Muchos de los físicos tenían buenas razones científicas para rechazar la causalidad detallada y no hizo falta que se «convirtieran». En cualquier caso, sólo una proporción muy pequeña de los físicos alemanes parece haber rechazado la causalidad antes de 1925-1926.
4. Sommerfeld, Einstein, Born, Planck y otros físicos destacados no cedieron ante el *Zeitgeist*, sino que lo criticaron explícitamente.
5. El reconocimiento de algún tipo de crisis en física atómica era generalizado alrededor de 1924, sobre todo debido a ciertas anomalías que la teoría atómica existente no podía explicar. Bohr y algunos otros físicos sugirieron vagamente que habría que abandonar la conservación de la energía y la descripción espacio-temporal (véase el capítulo 11).
6. La primera teoría acausal en física atómica, la teoría de la radiación de Bohr-Kramer-Slater de 1924, no tuvo una recepción uniformemente positiva entre los físicos alemanes, al contrario de lo que uno esperaría de acuerdo con la tesis del *Zeitgeist*. Y los que sí aceptaron la teoría estaban más impresionados por sus promesas científicas que por su corrección ideológica. El elemento de acausalidad de la teoría no se consideraba su característica más interesante. Además, la teoría tenía su origen en Copenhague, con un clima cultural muy diferente del de la Alemania de Weimar, y fue propuesta por un danés, un holandés y un estadounidense.
7. Entre los pioneros de la mecánica cuántica acausal estaban Bohr, Pauli y Dirac, ninguno de los cuales estaba influido por el *Zeitgeist* de Weimar. Los jóvenes físicos alemanes que crearon la mecánica cuántica estaban más interesados en sus carreras científicas que en tendencias culturales, e intentaban deliberadamente aislarse de lo que sucedía en la sociedad.

En conclusión, existían buenas razones –tanto internas como externas– para que la mecánica cuántica se originara en Alemania. En lo que yo puedo juzgar, la adaptación al *Zeitgeist* de Weimar no fue de particular importancia.

CAPÍTULO 11

Saltos cuánticos

Anomalías cuánticas

Como Bohr bien sabía, la teoría cuántica de los átomos de 1913 fue meramente el inicio de un programa de investigación que le llevaría a él y a sus colegas a un territorio desconocido; de ningún modo se consideraba una teoría terminada. Durante los años de la guerra, la teoría se extendió y modificó, principalmente por Bohr y un grupo de físicos alemanes, pero también –a pesar de las divisiones causadas por la guerra– por colegas británicos, holandeses y japoneses. La más importante de las primeras generalizaciones fue el resultado de un trabajo de Sommerfeld en Múnich, quien rápidamente se estableció como una autoridad en teoría atómica y logró un estatus superado sólo por el de Bohr. El magistral y comprehensivo libro de texto de Sommerfeld sobre teoría atómica, *Atombau und Spektrallinien,* basado en cursos impartidos en la Universidad de Múnich en 1916-1917, se publicó por primera vez en 1919. Durante los siguientes años, se publicaron siete nuevas ediciones y se convirtió en la «Biblia» de la teoría atómica para la generación de físicos de posguerra. En 1923 la tercera edición alemana se tradujo al inglés como *Atomic Structure and Spectral Lines.*

Sommerfeld, educado en matemáticas puras y experto en aplicar modelos matemáticos avanzados a problemas físicos, desarrolló la sencilla teoría de Bohr basándola en un uso extensivo de integrales de acción. De acuerdo a Sommerfeld, la descripción dinámica de sistemas atómicos con varios grados de libertad se basaba en condiciones cuánticas del tipo $\int p_i dq_i = n_i h$, siendo las q y las p coordenadas generalizadas de posición y momento, respectivamente, y los n números cuánticos integrales. El átomo de Sommerfeld de 1916 estaba caracterizado por sólo dos números cuánticos, el principal n y el azimutal k, y pronto se extendió con un número cuántico «magnético» m. Utilizando esta técnica, Sommerfeld fue capaz de reproducir la fórmula de Bohr para los niveles de energía del átomo de hidrógeno y de extenderla al caso relativista de estructura fina, un gran éxito de la antigua teoría cuántica. El formalismo de Múnich tam-

bién incluía el uso de los métodos de variables de acción-ángulo conocidos en mecánica celeste pero, hasta entonces, raras veces utilizados en física. Mediante estos métodos, en 1916 el físico ruso Paul Epstein (que vivía en Múnich, donde se le internó como extranjero enemigo) y el astrónomo Karl Schwarzschild proporcionaron cálculos detallados independientes del efecto Stark de acuerdo con los experimentos. La separación de las líneas espectrales en campos eléctricos intensos, descubierta por Johannes Stark en 1913, desafiaba una explicación clásica pero sus rasgos generales se podían entender sobre la base de la teoría de Bohr. Los primeros trabajos sobre el efecto Stark, incluyendo una teoría que Bohr propuso en 1914, resultaron en un acuerdo solamente cualitativo. Epstein concluía en 1916 que sus nuevos resultados «probaban lo correcto del modelo atómico de Bohr con tal sorprendente evidencia que hasta nuestros colegas conservadores no pueden negar su pertinencia» (Jammer 1966, p. 108). En el mismo año, Sommerfeld y Peter Debye, de manera independiente también, explicaron el desdoblamiento Zeeman sencillo en tripletes.

La herramienta favorita de Bohr en teoría atómica no eran las integrales de acción como las de Sommerfeld, sino el principio de correspondencia, que utilizó vagamente en 1913 y perfeccionó en una importante memoria en 1918. Este principio se convirtió en la piedra de toque de la primera escuela de teoría cuántica de Bohr y una importante guía conceptual para la construcción de la nueva mecánica cuántica. La esencia del principio de correspondencia, según Bohr lo entendía sobre 1920, era la siguiente: en el límite de número cuánticos grandes ($n \to n - m$, $m \ll n$), las transiciones a estados estacionarios no muy distintos del inicial resultarían en frecuencias casi idénticas de las que se esperarían clásicamente, es decir, a partir de la electrodinámica maxwelliana. Esto simplemente se seguía de la teoría cuántica del átomo de Bohr y no era el contenido del principio de correspondencia en su sentido más amplio.

Bohr se dio cuenta de que la teoría cuántica original era incompleta en el sentido de que, aunque prescribía frecuencias, no tenía nada que decir acerca de intensidades y polarización. Ésta era una seria deficiencia, ya que para comparar un espectro derivado teóricamente con uno obtenido experimentalmente, las intensidades deben ser conocidas. Bohr extendió, por tanto, el principio para cubrir también una correspondencia con las intensidades clásicas, en concreto, requiriendo una correspondencia entre los cuadrados de los coeficientes de Fourier del momento dipolar (la medida clásica de la intensidad) y los coeficientes de probabilidad de transición introducidos por Einstein en su teoría de la radiación de 1916-1917. En 1918 Bohr escribió, «podemos esperar que también para pequeños valores de n la amplitud de las vibraciones armónicas correspondientes a un valor dado de τ [siendo $n \to n - \tau$] proporcionaran de alguna manera una medida para la probabilidad de una transición entre dos estados para los que $n' - n''$ es igual a τ» (Darrigol 1992, p. 126).

Como importante consecuencia del principio de correspondencia, si una componente armónica particular es cero, la probabilidad de transición será también cero; es decir, la transición estará «prohibida». De esta manera, Bohr y sus asistentes aplicaron el principio de correspondencia para estimar intensidades de líneas espectrales y para

deducir reglas de selección. Por ejemplo, mientras que el físico polaco Adalbert Rubinowicz, un asistente de Sommerfeld, había deducido la regla de selección $\Delta k = 0, \pm 1$ para el número cuántico azimutal, Bohr razonó a partir de su principio de correspondencia que las transiciones $\Delta k = 0$ no podían ocurrir. La evidencia espectroscópica mostró que el resultado de Bohr era el correcto. Una de las primeras y más impresionantes aplicaciones del principio de correspondencia fue debida a Hendrick A. Kramers, un joven holandés que estudiaba bajo la dirección de Bohr en Copenhague. En su tesis doctoral de 1919, Kramers calculó en detalle las intensidades y polarizaciones de las líneas espectrales del hidrógeno, incluyendo los efectos Zeeman y Stark. Sus resultados estaban en buen acuerdo, aunque no perfecto, con los datos experimentales.

El principio de correspondencia era fundamentalmente un invento de Bohr y fue recibido con bastante escepticismo en Alemania, donde los principios cuánticos más formales y los procedimientos deductivos de Sommerfeld se consideraban más prometedores. Para Sommerfeld, el principio de correspondencia tenía demasiado carácter de «varita mágica», como lo denominó en la primera edición de su *Atombau*. En 1935, Kramer recordaba cómo muchos físicos percibían en uso semiintuitivo del principio: «En un inicio, el principio de correspondencia les parecía a los físicos una varita mágica algo mística, que no funcionaba fuera de Copenhague» (Kragh 1979, p. 156). La magia de Bohr era particularmente fuerte, y particularmente confusa, en su uso del principio de correspondencia en su «segunda teoría atómica» de 1921-1923, en la cual intentó explicar la estructura atómica de todos los elementos de la tabla periódica. Tomando ecléctica mente de una mezcla de espectroscopía de rayos X, datos químicos, argumentos de correspondencia y vagos principios de simetría, Bohr construyó modelos atómicos de dos números (n, k) desde el hidrógeno hasta el uranio. Hasta llegó a derivar la configuración electrónica para el hipotético elemento de número atómico 118, prediciendo que pertenecería a la categoría de los gases inertes. Al contrario de su imagen de 1913, los electrones se movían ahora en elipses keplerianas y durante sus órbitas penetraban la región de electrones internos, causando con ello un acoplamiento de los electrones en revolución. Bohr proporcionó una exposición global de su teoría durante un encuentro en Gotinga en 1922. Su estilo y manera de pensar –quizá más que la teoría misma– impresionó profundamente a los participantes, entre los que se encontraba la mayor parte de la elite de física atómica alemana. Varios de los jóvenes físicos se fueron de su primer encuentro con el maestro de la brujería atómica convencidos del gran valor del principio de correspondencia.

Aunque la teoría del sistema periódico de Bohr fuera pronto superada por teorías mejores, por primera vez proporcionó una explicación razonablemente satisfactoria de la estructura atómica de todos los elementos químicos. En particular, Bohr argumentó que los elementos de la clase de las tierras raras se caracterizaban por una acumulación gradual en el nivel $n = 4$, desde 3×6 electrones en el lantano hasta 4×8 electrones en el lutecio, con la implicación de que el elemento desconocido de número atómico 72 estaría relacionado químicamente con el circonio y no sería una tierra rara. La predicción de Bohr se verificó a finales de 1922, cuando el elemento 72 (el hafnio)

se descubrió en minerales de circonio. Aunque la predicción no se deducía de la teoría de Bohr sin ambigüedades, el descubrimiento se consideró con generalidad una brillante confirmación de esta teoría en particular y de la teoría cuántica de los átomos en general. Como se mencionó en el capítulo 10, el descubrimiento condujo a un prolongado conflicto de prioridades.

Para cada éxito de la teoría de Bohr-Sommerfeld, existía un fracaso o una anomalía. El átomo de hidrógeno (y otros sistemas atómicos de un electrón) quedaba brillantemente explicado por la teoría, pero hasta el segundo átomo más sencillo, el helio, resultó ser un problema. Entre 1918 y 1922, Bohr y Kramers en Copenhague, Edwin Kemble y John van Vleck en Harvard, Alfred Landé en Frankfurt am Main y James Franck y Fritz Reiche en Berlín investigaron el espectro del helio con las herramientas disponibles de la teoría cuántica. Utilizaron distintos métodos y estrategias, pero el resultado global fue uniformemente decepcionante: aunque las predicciones de la teoría cuántica no eran totalmente distintas de lo medido, las discrepancias eran lo suficientemente patentes como para que la mayoría de los expertos estuviera de acuerdo con la conclusión de Van Vleck en 1922, «alguna modificación radical de la teoría cuántica convencional de la estructura atómica parece necesaria» (Kragh 1979, p. 132). Esto quedó incluso más claro en 1923, cuando Born y Heisenberg presentaron un análisis detallado y sistemático del átomo de helio y concluyeron que el espectro obtenido difería del observado. Esto era, como Born escribía a Bohr, una «catástrofe» (Darrigol 1992, p. 177). El efecto Zeeman anómalo en los átomos con muchos electrones no era menos catastrófico. Durante 1920-1924, muchos físicos atacaron el problema, incluyendo a Landé, quien pudo proporcionar una explicación fenomenológica de la observada separación de las líneas espectrales. Sin embargo, ni Sommerfeld, Pauli, Heisenberg ni otros físicos que se ocuparon del problema podían justificar sus resultados en términos de la teoría cuántica. «Es una gran desgracia lo de la teoría del efecto Zeeman anómalo», escribió Pauli a Sommerfeld el 19 de julio de 1923. Añadió que la desgracia involucraba a «todos los átomos que contengan más de un electrón» (Mehra y Rechenberg 1922, pp. 1, 502).

De hecho, la desgracia no estaba limitada a los átomos con más de un electrón. Hasta sistemas con un solo electrón daban problemas, aunque esto se admitía con más reticencias por parte de los físicos que querían creer que la teoría de los átomos de hidrógeno estaba en perfecta forma. En 1921-1923 el ión de la molécula de hidrógeno (H_2^+) fue investigado por Pauli e, independientemente, por Karl F. Niessen en los Países Bajos. La energía de ionización calculada no concordaba con los experimentos que se realizaron poco después. Otra anomalía fue el descubrimiento de Otto Oldenberg en 1922, en la Universidad de Múnich, de que las líneas del hidrógeno exhibían un efecto Zeeman anómalo en bajos campos magnéticos (al contrario del efecto Zeeman normal en campos más elevados). De acuerdo a la teoría de Bohr-Sommerfeld, este efecto, denominado de Paschen-Back (por Friedrich Paschen y Ernst Back, quienes lo descubrieron en 1912) no debería ocurrir en el hidrógeno. En 1924 se llegó a la conclusión de que la teoría cuántica no podía describir el caso de un electrón moviéndo-

se en campos cruzados magnéticos y eléctricos. Además, el enlace covalente entre, por ejemplo, dos átomos de hidrógeno, se seguía sin explicar; en general, la teoría cuántica de los físicos tenía poco que ofrecer a los químicos. A finales de 1924, Robert Mulliken concluía a partir de su estudio de los espectros moleculares que el estado más bajo del oscilador armónico no era cero, sino que estaba dado por $1/2\ h\nu$. La existencia de una energía del punto cero estaba de acuerdo con la malograda teoría de Planck de 1911, pero no con los desarrollos posteriores. El problema era que de acuerdo con la teoría de Bohr-Sommerfeld, no debería haber una energía del punto cero, al contrario del descubrimiento de Mulliken. Finalmente, entre 1921 y 1924 se estableció experimentalmente que los electrones lentos penetran libremente un gas de argón a pesar de los fuertes campos de fuerzas interatómicas. Este efecto, denominado de Ramsauer, descubierto (entre otros) por el físico de Heidelberg Carl Ramsauer, se reconoció como un fenómeno cuántico de algún tipo, pero no se pudo explicar. Existían por tanto muchos experimentos relevantes y hechos que la teoría de Bohr-Sommerfeld era incapaz de explicar y, en este sentido, eran anomalías. Sin embargo, la mayoría de ellos no se consideraban problemas muy serios y resultaron ser de importancia limitada en el proceso que creó la crisis cuántica en 1924, aproximadamente. Por ejemplo, la mayoría de los físicos ignoraron o minimizaron la incapacidad de explicación de la teoría para dar cuenta de las valencias, e incluso la anomalía del ión de la molécula de hidrógeno no se consideraba un problema principal de la misma naturaleza que el átomo de helio y el efecto Zeeman anómalo.

En 1924, la acumulación de anomalías experimentales, junto con una falta de satisfacción generalizada con la estructura lógica y conceptual de la teoría cuántica existente, llegaron a crear una situación de crisis en la pequeña comunidad de físicos atómicos. Varios físicos concluyeron que la teoría de Bohr-Sommerfeld era irremediablemente errónea y debía reemplazarse con alguna otra teoría. Por otro lado, dados sus muchos éxitos, la «vieja» teoría atómica difícilmente podía estar completamente equivocada y se esperaba generalmente que estuviera relacionada con la nueva teoría cuántica mediante algún tipo de principio de correspondencia. Max Born creía en 1923 que «todo el sistema de conceptos de la física debe reconstruirse desde abajo hasta arriba» (Forman 1968, p. 159). Fue también Born el que acuñó el término «mecánica cuántica» en un artículo de 1924, en el que se ocupaba de la problemática traducción de las fórmulas clásicas a sus análogos en la teoría cuántica mediante el principio de correspondencia. Se reconocía lo inadecuado de la teoría de Bohr-Sommerfeld y se señalaba un nombre –mecánica cuántica– para su sucesora. Por desgracia, ninguno sabía el aspecto que tendría esta futura mecánica cuántica.

La primera teoría cuántica se cultivaba en tres centros de investigación en particular. En Múnich, Sommerfeld estableció su importante escuela con científicos como Epstein, Rubinowicz, Gregor Wentzel y Wilhelm Lenz entre sus colaboradores. Born se empezó a interesar en teoría atómica relativamente tarde, sólo en 1921 tras haber llegado a ser catedrático en Gotinga; con asistentes como Pauli, Friedrich Hund y Pascual Jordan, hizo de Gotinga un centro mundial de la teoría cuántica. Existían estrechas co-

TABLA 11.1
Físicos visitantes extranjeros en Copenhague, 1919-1930

Nombre	*Años*	*Edad*	*País*
H. Casimir	1929, 1930	20	Países Bajos
C. Darwin	1927	40	Gran Bretaña
D. Dennison	1924-1926, 1927	24	EEUU
P. Dirac	1926-1927	24	Gran Bretaña
R. Fowler	1925	36	Gran Bretaña
J. Franck	1921	39	Alemania
E. Fues	1927	34	Alemania
G. Gamow	1928-1929, 1930	24	URSS
S. Goudsmit	1926, 1927	24	Países Bajos
D. Hartree	1928	31	Gran Bretaña
W. Heisenberg	1924-1925, 1926-1927	22	Alemania
W. Heitler	1926	22	Alemania
G. Hevesy	1920-1926	35	Hungría
E. Hückel	1929	33	Alemania
F. Hund	1926-1927	30	Alemania
P. Jordan	1927	25	Alemania
O. Klein	1918-1922, 1926-1931	24	Suecia
H. Kramers	1916-1926	22	Países Bajos
L. Landau	1930	22	URSS
A. Landé	1920	32	Alemania
N. Mott	1928	23	Gran Bretaña
Y. Nishina	1923-1928	33	Japón
W. Pauli	1922-1923	22	Austria
L. Pauling	1927	26	EEUU
S. Rosseland	1920-1924, 1926-1927	26	Noruega
A. Rubinowicz	1920, 1922	31	Polonia
J. Slater	1923-1924	23	EEUU
L. Thomas	1925-1926	22	Gran Bretaña
G. Uhlenbeck	1927	30	Países Bajos
H. Urey	1923-1924	30	EEUU
I. Waller	1925-1926, 1927, 1928	27	Suecia

Nota: Esta lista no es completa. La edad se refiere a la edad del físico en su primera visita. Todos los físicos visitantes trabajaban con Bohr en la Universidad de Copenhague, desde 1921 en el Instituto de Física Teórica de Bohr. Los 63 físicos visitantes por al menos un mes entre 1920 y 1930 eran de 17 países, siendo el mayor número de visitantes de los Estados Unidos (14), Alemania (10), Japón (7), Inglaterra (6) y los Países Bajos (6). *Fuente:* Robertson 1979.

nexiones entre los dos centros alemanes, un ejemplo de lo cual eran Pauli y Heisenberg, estudiantes de Sommerfeld, que llegaron a Gotinga desde Múnich. Fue Bohr en Copenhague, sin embargo, la fuerza dominante en la primera fase de la teoría atómica. Un nuevo instituto universitario de física teórica, conocido generalmente como el «Instituto de Bohr» se fundó en 1921 y atrajo a un gran número de visitantes de todo el mundo. Tanto antes como después de la mecánica cuántica, se reconocía que el instituto de Bohr era la meca de la teoría atómica (tabla 11.1).

La mecánica cuántica de Heisenberg

El camino hacia la mecánica cuántica pasaba por la teoría de la radiación, e incluía como un importante componente los intentos de construir teorías mecánico-cuánticas de la dispersión basadas en ecuaciones en diferencias, en vez de diferenciales. Este trabajo lo llevaban a cabo Born y sus colaboradores en Gotinga, y también en Copenhague, donde Kramers había estado profundamente ocupado con el problema de la dispersión. En otoño de 1924, Kramers y Heisenberg publicaron una importante teoría de la dispersión que, en retrospectiva, puede considerarse el primer paso decisivo hacia la nueva mecánica cuántica. El problema de la radiación se había convertido por aquel entonces en uno agudo, especialmente como resultado del descubrimiento por parte de Arthur Compton en 1923 de que los pulsos de rayos X monocromáticos actúan como partículas con momentos y energía de acuerdo con la vieja hipótesis cuántica para la luz ($p = h\nu/c$ y $E = h\nu$, siendo ν la frecuencia). Una conclusión similar se obtuvo independientemente por Debye en Zúrich. El importante descubrimiento de Compton causó gran preocupación en Copenhague, donde Bohr se resistía firmemente al cuanto de luz, o la interpretación fotónica. Como alternativa, Bohr y Kramers desarrollaron una idea de John Slater en una teoría de radiación no fotónica. La teoría Bohr-Kramers-Slater de 1924 estaba basada en la noción de «osciladores virtuales» y la suposición de que la energía se conservaba sólo estadísticamente en las interacciones entre átomos y radiación. Bohr y sus colaboradores abandonaron no sólo la conservación de la energía estricta, sino que también argumentaron que los procesos radiactivos no se podían describir causalmente en tiempo y espacio. Aunque la controvertida teoría Bohr-Kramers-Slater tuvo una corta vida –quedó abandonada cuando Walther Bothe y Hans Geiger mostraron en la primavera de 1925 que no se correspondía con los experimentos– fue muy influyente y guió a Heisenberg en su pensamiento posterior. Bohr aceptó la refutación experimental, pero no el fotón.

Bohr, Kramers, Heisenberg y Pauli discutieron la creciente crisis en la teoría cuántica en un encuentro en Copenhague en marzo de 1925. Unos meses después, de vuelta a Gotinga, Heisenberg encontró una manera de formular una teoría cuántica abstracta que prometía ser fundamental, lógicamente consistente y libre de las dificultades de la teoría de Bohr-Sommerfeld. El tema conceptual conductor de la nueva teoría era, como Heisenberg escribió en su breve resumen de su seminal artículo en *Zeitschrift für Physik* el 18 de septiembre de 1925, la búsqueda de un «fundamento para una mecánica cuántica teórica fundada exclusivamente en relaciones entre cantidades que son

en principio observables». Más adelante en el artículo, elaboró este punto: «Parece sensato descartar toda esperanza de observar cantidades hasta ahora inobservables, como la posición y el periodo del electrón [...] En vez de eso, parece más razonable intentar establecer una mecánica cuántica teórica, análoga a la mecánica clásica, pero en la cual sólo aparezcan relaciones entre cantidades observables». El criterio positivista de observabilidad era la base filosófica de la teoría, pero no se trataba de un cimiento particularmente nuevo o controvertido. La idea de que la teoría cuántica debería construirse sobre cantidades observables, y de que por tanto había que rechazar las órbitas electrónicas, fue entonces ampliamente discutida, especialmente por parte de Pauli y Born. Ya en 1919, en conexión con una crítica de la teoría unificada de gravitación y electromagnetismo de Weyl, Pauli había enfatizado que sólo las cantidades observables deberían figurar en teorías físicas. En la primavera de 1925, Born y Jordan repitieron el mismo mensaje en un contexto mecánico-cuántico, llamándolo «un principio fundamental de gran importancia y fertilidad». De todos modos, no existía un camino claro desde el principio de observabilidad a la mecánica cuántica, las raíces de la cual se pueden encontrar sobre todo en el sofisticado uso por parte de Heisenberg del principio de correspondencia de Bohr y su intensa interacción intelectual con Pauli.

Para proporcionar una imagen tan sólo aproximada del razonamiento de Heisenberg, consideremos la coordenada de posición de un electrón en un átomo, $x(n,t)$, donde n puede denotar la energía. El electrón puede realizar un movimiento periódico con frecuencia $\omega(n)$. Aunque $x(n,t)$ no es una cantidad observable, se puede escribir como una serie de Fourier, y los términos de ésta pueden relacionarse con observables; es decir, se puede escribir como $\Sigma a_\alpha(n) \exp[i\alpha\omega(n)t]$, donde el sumatorio es sobre los valores enteros de α. La expresión se caracteriza por un juego doble de índices, n y α, y Heisenberg sugirió que el término clásico $a_\alpha(n) \exp[i\alpha\omega(n)t]$ correspondía al término cuántico $a(n, n-\alpha) \exp[i\omega(n, n-\alpha)t]$. La nueva magnitud era una matriz o tabla de símbolos que dependía de la transición entre los dos estados cuánticos n y $n-\alpha$. Heisenberg encontró que la multiplicación de dos tablas cuánticas de este tipo, x e y, no satisfacía la ley conmutativa, es decir, que xy era distinto de yx. Éste era un resultado misterioso, y al principio Heisenberg lo consideró más desconcertante que importante.

La nueva «reinterpretación» *(Umdeutung)* de la mecánica por parte de Heisenberg era altamente abstracta y no se entendía fácilmente, ni tan siquiera por el mismo Heisenberg. La teoría conducía a algunos resultados físicos, aunque al principio no fueran muy impresionantes. Heisenberg planeaba al principio aplicar su teoría al átomo de hidrógeno, pero descubrió que incluso este sencillo caso era demasiado complicado para resolver. Por lo tanto se centró en el caso menos realista, pero sin ser trivial, del oscilador inarmónico, que consiguió tratar satisfactoriamente. Al mismo tiempo, pudo ofrecer una justificación de la condición de frecuencia de Bohr ($E_n - E_m = h\nu_{nm}$) y las condiciones de cuantización de Bohr-Sommerfeld. Para el oscilador armónico, encontró el espectro de energías $E_n = (n + 1/2)\, h\nu$ derivando así la energía del punto cero que había recibido un reciente apoyo de la espectroscopía molecular. En Gotinga, Born pronto se dio cuenta de la importancia de la teoría de Heisenberg, la cual examinó y extendió en un artículo escrito con Jordan. Bohr

se dio cuenta de que la multiplicación simbólica no conmutativa de Heisenberg se podía escribir utilizando el cálculo matricial y que las variables mecánico-cuánticas eran matrices. Sobre esta base, Born y Jordan probaron la relación fundamental de conmutación entre momento y posición: $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = (h/2\pi i)\,\mathbf{1}$, siendo $\mathbf{1}$ la matriz unidad. Con el conocimiento de que el cálculo matricial estaba diseñado para la mecánica cuántica, las cosas progresaron rápidamente. La teoría de Heisenberg quedó establecida sobre una firme base en noviembre de 1925 con el famoso «artículo de los tres hombres» *(Dreimännerarbeit)* de Born, Heisenberg y Jordan. Sin utilizar (o sin tener idea de) matrices, la teoría también fue desarrollada por un tal Paul Dirac de 23 años en la Universidad de Cambridge. En el otoño de 1925, Dirac tenía preparada su propia versión de la mecánica cuántica, construida sobre una traducción de los productos de Heisenberg de dos cantidades cuánticas $(xy - yx)$ a los corchetes de Poisson que se conocían de la dinámica clásica. Muchos de los resultados que Born, Heisenberg y Jordan hallaron fueron obtenidos independientemente por Dirac, cuya versión algebraica de la mecánica cuántica sería conocida como el álgebra de números q.

Fuera cual fuera la versión, la nueva mecánica cuántica era más impresionante desde un punto de vista matemático que desde uno empírico. Muchos físicos eran escépticos por la falta de visibilidad de la teoría y su poco familiar formalismo matemático. Querían ver si la teoría también era empíricamente fructífera y podría considerar sistemas físicos simples que ocurrieran de verdad en la naturaleza. Un requerimiento mínimo era que pudiera reproducir el espectro del hidrógeno de acuerdo con la vieja teoría de Bohr. Pauli y Dirac trataron independientemente el átomo de hidrógeno no relativista de acuerdo a la mecánica cuántica y mostraron a principios de 1926 que proporcionaba los resultados correctos. Por aquel entonces, la hipótesis del espín electrónico había sido introducida a partir de evidencia experimental de los físicos holandeses Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck. Este extremadamente importante descubrimiento no fue bien recibido en absoluto por los creadores de la mecánica cuántica. Al principio Bohr y Pauli rechazaron la idea del espín del electrón, entre otras razones porque parecía inconsistente con la estructura fina del hidrógeno. En cambio, un análisis más detallado demostró que no existía conflicto entre el espín y la mecánica cuántica, y en la primavera de 1926 Heisenberg y Jordan utilizaron una forma simple de la mecánica cuántica del espín para derivar la estructura fina del hidrógeno en aproximado acuerdo con la fórmula de Sommerfeld. Esto fue satisfactorio, y fue incluso más satisfactorio que también obtuvieran con éxito una explicación del efecto Zeeman anómalo, el viejo enigma que la primera teoría cuántica había arrastrado. Sin embargo, éstas eran sólo reproducciones de resultados que ya se conocían. Hasta el momento, la mecánica cuántica no había producido ni una sola predicción de un fenómeno nuevo.

La ecuación de Schrödinger

El austriaco Erwin Schrödinger, catedrático de física en la Universidad de Zurich, no pertenecía a la tradición de Copenhague-Gotinga-Múnich. Había trabajado en va-

rios campos, incluyendo radiactividad, relatividad general, termodinámica y teoría de los gases, pero no había mostrado mucho interés por la espectroscopía ni la teoría atómica. Cuando empezó a desarrollar la mecánica ondulatoria, conocía la nueva teoría de Heisenberg, pero era una teoría que no le resultaba atractiva y que no le inspiraba. Por el contrario, como escribió en uno de sus artículos de 1926 sobre mecánica ondulatoria, «no tenía ninguna conciencia en absoluto de una relación genética con Heisenberg. Naturalmente, conocía su teoría, pero por los métodos de álgebra trascendental que, para mí, parecían muy difíciles y por la falta de claridad de visualización [*Anschaulichkeit*], me sentía desanimado con respecto a ella, por no decir repelido» (Moore 1989, p. 205). Comparado con Heisenberg, Dirac, Jordan y Pauli, Erwin Schrödinger no era sólo conservador, sino que, a sus 39 años, también era «mayor». Pero no fue un caso sin remedio, como quedaría claro.

En 1925, mientras trabajaba en la teoría de los gases, Schrödinger estudió el trabajo de un físico francés relativamente desconocido, Louis de Broglie, quien sugirió en su tesis de 1924 una profunda dualidad entre materia y ondas. En un intento de unir la teoría cuántica y la relatividad, De Broglie propuso combinar las dos fórmulas de Einstein de 1905 para la energía de los cuantos de luz y de materia mediante la sencilla pero especulativa relación $h\nu = mc^2$. Es decir, de acuerdo a De Broglie, a una partícula de masa m se le podría asignar una frecuencia y se podría caracterizar con una onda de fase. De Broglie utilizó su idea para proponer una interpretación ondulatoria de la condición de cuantización de Sommerfeld y predecir que un haz de electrones moviéndose con momento p exhibiría una naturaleza ondulatoria con una longitud de onda dada por $\lambda = h/p$. Este resultado, válido para todo tipo de partículas y derivado ulteriormente a partir de la mecánica cuántica define la famosa longitud de onda de De Broglie. La teoría no fue recibida favorablemente y fue ignorada por la mayor parte de los físicos fuera de París. La física teórica francesa tenía una pobre reputación entre los físicos atómicos y no se esperaba que nada interesante pudiera venir de París. El boicot oficial francés a la física alemana no hizo que las cosas fueran más fáciles para que se apreciara un destello del genio de París. Sin embargo, Einstein encontró algunas de las ideas de De Broglie útiles para su propio trabajo sobre la teoría cuántica de gases (estadística de Bose-Einstein) y, a través de Einstein, fueron asumidas por Schrödinger, estando este último también interesado principalmente en la teoría de De Broglie en conexión con la teoría de gases, pero que a finales de 1925 se concentró en una nueva teoría ondulatoria de los átomos inspirada por el dualismo onda-partícula de De Broglie. El resultado fue una ecuación ondulatoria para el átomo del hidrógeno que, al resolverse, proporcionaría los autovalores de la energía: es decir, el espectro. Esta primera ecuación de Schrödinger era, de acuerdo con la teoría de De Broglie, totalmente relativista y, por lo tanto, se esperaba que proporcionara la fórmula de estructura fina de Sommerfeld. Cuando Schrödinger consiguió resolver finalmente la ecuación, encontró sin embargo que, aunque sí que proporcionaba una fórmula para la estructura fina, no reproducía el espectro correcto. Algo había ido mal, y Schrödinger decidió publicar sólo la aproximación no relativista y la fórmula de Bohr resultante.

El trabajo de Schrödinger sobre mecánica ondulatoria apareció en cuatro largos artículos en *Annalen der Physik* en la primavera y verano de 1926, bajo el título común «La cuantización como un problema de autovalores». El físico austriaco introdujo su ecuación ondulatoria fundamental de distintas maneras, ninguna de las cuales reflejaba la ruta que originalmente le había conducido a la ecuación. Lo importante era la misma ecuación para los autovalores de la energía, la cual escribió como $\Delta\psi + 8\pi^2 m/h^2(E - V) = 0$ para una partícula sometida a una fuerza con energía potencial V. Para el átomo de hidrógeno, $V = -e^2/r$. Schrödinger hizo notar que la ecuación se seguiría de la ecuación de movimiento clásica $E = p^2/2\ m + V$ si el momento se reemplazara por el operador diferencial $h/2\pi i\ \partial/\partial x$ actuando sobre la función ondulatoria ψ. La cuantización no se introducía axiomáticamente sino que, de algún modo, se explicaba, requiriendo que la ecuación de ondas que satisficiera la ecuación fuera univaluada. Siguiendo la misma línea, Schrödinger creyó haber explicado los saltos cuánticos discontinuos de Bohr en términos de la teoría ondulatoria, una noción que le disgustaba profundamente. «Es escasamente necesario señalar», recordaba a los lectores de *Annalen*, «cuánto más gratificante sería concebir una transición cuántica como un intercambio de energía de un modo de vibración a otro que la contemplara como un salto de electrones. La variación de los modos de vibración podría tratarse como un proceso continuo en tiempo y espacio y que sería tan largo como lo que persistiera el proceso de emisión» (Jammer 1966, p. 261). De modo similar, en una carta a Lorentz, Schrödinger describió el modelo de emisión de luz de Bohr como «monstruoso» y «realmente, casi inconcebible». Estaba evidentemente emocionado de poderse librar de tales monstruosidades: «Estaba tan extremadamente feliz, primero, de haber llegado a una imagen en la cual por fin una cosa u otra realmente ocurre con la frecuencia que observamos en la luz emitida que, con el acelerado aliento de un fugitivo perseguido, me lancé sobre este algo en la forma en la cual se me ofreció de la manera más inmediata, que era con las amplitudes subiendo y bajando periódicamente con las frecuencias del pulso» (MacKinnon 1982, p. 234). En verano de 1926, Schrödinger introdujo el operador energía $E = -h/2\pi i\ \partial/\partial t$ y formuló la ecuación ondulatoria dependiente del tiempo como $ih/2\pi\ \partial\psi/\partial t = H\psi$ o simplemente $H\psi = E\psi$, siendo ψ una función tanto de las coordenadas del espacio como del tiempo y H el operador de Hamilton. Al mismo tiempo, se dio cuenta de que la función de ondas tenía que ser una función compleja (en el sentido matemático) y no, como había creído antes, real.

La mecánica ondulatoria de Schrödinger presentaba grandes ventajas sobre los sistemas de mecánica cuántica rivales. En particular, se construía con operaciones y conceptos matemáticos bien conocidos en otras áreas de la física teórica y era por tanto mucho más fácil de utilizar en cálculos prácticos. Los físicos que no estaban bien familiarizados con los métodos matemáticos podían consultarlos en *Methods of Mathematical Physics* de Richard Courant y David Hilbert, que apareció en 1924 y resultó cubrir justamente los métodos que se necesitaban en la nueva mecánica cuántica. Además de facilitar los cálculos, la mecánica ondulatoria era también menos abstracta que la mecánica matricial y, de acuerdo a muchos físicos, preferible desde un punto de vis-

ta conceptual. La mayoría de los resultados derivados por Schrödinger eran un duplicado de los resultados ya obtenidos, por lo general de una manera más aparatosa, mediante mecánica cuántica. Por ejemplo, Schrödinger encontró que los autovalores del oscilador armónico eran $E_n = (n + 1/2)h\nu$, el mismo resultado que había hallado Heisenberg. ¿Cómo podía ser que la mecánica cuántica y la ondulatoria, dos teorías basados en conceptos naturales completamente distintos y utilizando herramientas matemáticas muy distintas, produjeran los mismos resultados cuando se aplicaban a sistemas físicos simples? Se sospechaba que las dos teorías eran equivalentes matemáticamente (pero no físicamente) desde hacía tiempo y, en la primavera de 1926, Schrödinger probó que cualquier ecuación mecánico-ondulatoria podía traducirse en una ecuación correspondiente en mecánica cuántica o matricial, y viceversa. Carl Eckart en Estados Unidos proporcionó una prueba de equivalencia similar de manera independiente, y también Pauli, que no se molestó en publicarla.

En cuanto a la cuestión de la naturaleza y signifación de la función de onda, Schrödinger no era muy claro. Por un tiempo, quería entender las partículas como consistentes en ondas, es decir, construir partículas solamente de paquetes de onda concentrados. Sin embargo, su modelo ondulatorio de la materia encontró dificultades y más adelante en 1926, Schrödinger sugirió que la función de ondas, a través del producto $\psi\psi^*$ (donde ψ^* es el complejo conjugado de ψ) era una suerte de función peso eléctrica, con la densidad de carga representada por $e\psi\psi^*$. De acuerdo con esta imagen, el electrón no era por tanto una partícula localizada con precisión, sino que estaba repartida por el espacio. Poco después Born, en un estudio de procesos de colisión, sugirió su famosa interpretación probabilística, según la cual $\psi\psi^* dV$ es la probabilidad de que la partícula esté en el estado ψ en el elemento de volumen dV. La interpretación de Born, rápidamente adoptada y desarrollada por Pauli, Jordan, Dirac y otros, fue de gran importancia porque introdujo explícitamente un elemento de probabilidad irreductible en la microfísica. Esto implicaba un cambio en el significado de las leyes naturales, pero no que las leyes causales no fueran ya fundamentales en física. Como formuló Born en su artículo del verano de 1926, «el movimiento las partículas se pliega a las leyes de la probabilidad, pero esta probabilidad se propaga de acuerdo a la ley de causalidad» (Jammer 1966, p. 285).

La mecánica ondulatoria de Schrödinger se recibió inicialmente con cierto escepticismo, y a veces incluso con hostilidad, entre los teóricos cuánticos en Gotinga y Copenhague. Tendían a considerar el énfasis en virtudes clásicas como la continuidad espacio-temporal y la visualización como un paso retrógrado. Heisenberg informó a Pauli que encontraba la teoría de Schrödinger «desagradable». Por otro lado, reconocían la fuerza del sistema de Schrödinger y, tras las pruebas de equivalencia, la mayoría de ellos adoptaron una actitud pragmática hacia las dos formulaciones rivales de la mecánica cuántica. La mayoría de los físicos utilizaba el lenguaje y matemáticas de la mecánica ondulatoria, pero interpretaban la teoría de Schrödinger de acuerdo con las ideas de Bohr, Heisenberg y Born. Tras la interpretación probabilística de la mecánica cuántica de Born, la pregunta de cómo generalizar la interpretación y relacionarla con

la mecánica matricial pasó a primer término. El paso esencial en este proceso, que llevaría a un formalismo completamente general y unificado de la mecánica cuántica, fue la teoría de transformaciones desarrollada por Dirac y Jordan de manera independiente a final de 1926. Con esta teoría, la mecánica cuántica obtuvo una elegante estructura matemática y la diferencia entre las formulaciones de Schrödinger y Heisenberg pronto perdieron casi toda su significación anterior.

Incluso en este satisfactorio estado, y las múltiples aplicaciones exitosas de la mecánica cuántica en la espectroscopía y en otras áreas de la física, la teoría no dejaba de tener problemas. Estaba, por ejemplo, la cuestión de la relación entre la relatividad y la mecánica cuántica. En el caso de que la mecánica cuántica fuera realmente una teoría fundamental del microcosmos, debería ser consistente con la teoría fundamental de los cuerpos macroscópicos, la teoría (especial) de la relatividad. Sin embargo era obvio desde el principio que esto no era así. La ecuación de Schrödinger es de segundo orden en derivadas espaciales y de primero en la derivada temporal, en contradicción con la teoría de la relatividad. No era demasiado difícil construir una ecuación de ondas cuántica relativista, como Schrödinger había hecho en privado y como Oskar Klein, Walter Gordon y varios físicos hicieron en 1926-1927. Por desgracia, esta ecuación, conocida como la ecuación de Klein-Gordon, no proporcionaba la estructura fina del hidrógeno correcta y resultó imposible de combinar con la teoría del espín que Pauli había propuesto en 1927. La solución apareció en enero de 1928, cuando Pauli publicó su clásico artículo «La teoría cuántica del electrón», que incluía una ecuación ondulatoria relativista que incorporaba automáticamente el espín correcto. La ecuación de Dirac era de la misma forma general que la de Schrödinger, $H\psi = ih/2\pi\ \partial\psi/\partial t$, pero la función de Hamilton era de primer orden en $\partial\psi/\partial x$ incluyendo matrices con cuatro filas y cuatro columnas; por tanto, la ecuación ondulatoria de Dirac tenía cuatro componentes. Es notable que, sin introducir el espín del electrón al principio, la ecuación contenía el espín correcto. La nueva teoría se aceptó rápidamente cuando se vio que la ecuación de autovalores de Dirac para un átomo de hidrógeno proporcionaba exactamente la misma ecuación para la energía que Sommerfeld había derivado en 1916. La ecuación ondulatoria relativista de Dirac marcó el final de la fase pionera y heroica de la mecánica cuántica, y también marcó el principio de una nueva fase. Pronto quedó claro que la ecuación contenía sorpresas, sutilezas y problemas que Dirac jamás habría imaginado al derivarla.

Difusión y recepciones

La mecánica cuántica se difundió rápidamente desde Gotinga y los otros centros donde se había construido originalmente la teoría. La transmisión de nuevas ideas y resultados tuvo lugar formalmente, a través de revistas científicas, además de informalmente, a través de conferencias e intercambio de cartas y manuscritos. La red informal organizada alrededor de Gotinga y Copenhague incluía sólo a un pequeño grupo de físicos europeos, y contaban con la ventaja de unas comunicaciones rápidas

frente a los que quedaban fuera de ella. Desde el verano de 1925 a la primavera de 1926, las publicaciones sobre mecánica cuántica se dispararon; al principio, su número se duplicaba cada dos meses. Entre julio de 1925 y marzo de 1927, se enviaron a las revistas científicas más de 200 artículos sobre la nueva teoría; el tiempo que mediaba entre la recepción de un manuscrito por los editores y la aparición impresa era a menudo muy corto: sirva como ilustración el artículo de Dirac sobre el espectro del hidrógeno que se recibió en los *Proceedings of the Royal Society* el 22 de enero de 1926 y se publicó el 1 de marzo de ese año. Incluso más rápida fue la publicación del artículo de Born sobre problemas de colisión, en el que introdujo la interpretación probabilística. *Zeitschrift für Physik* recibió el artículo el 25 de junio de 1926 y se publicó el 10 de julio. Las velocidades de publicación tenían una explicación: de acuerdo con la política de *Zeitschrift*, cualquier físico «reputado» podía publicar su artículo sin necesidad de arbitraje. Max Born era sin duda un físico reputado. En el caso de los *Proceedings*, un miembro plenario (*fellow*) de la Royal Society podía proponer artículos de otra persona y, de este modo, evitar la necesidad de árbitros. El artículo de Dirac fue propuesto por Ralph Fowler, *fellow* de la Royal Society.

La simple tarea de mantenerse al día con la literatura era difícil. Edward Condon recordaba el ritmo al que se desarrollaba la mecánica cuántica en aquella época: «Las grandes ideas aparecían tan rápido durante ese periodo (1926-1927) que uno sacaba una impresión totalmente errónea del ritmo de progreso normal en física teórica. Uno sufría indigestión intelectual casi todo el tiempo ese año, y era de lo más desalentador» (Sopka 1988, p. 159). El clima era altamente competitivo y frecuentemente distintos físicos publicaban los mismos resultados independientemente, o los físicos tenían que abandonar totalmente la idea de publicar sus resultados al ser superados por colegas competidores. En este juego de publicaciones, los físicos alemanes y sus aliados en Copenhague tenían la ventaja de un fácil y rápido acceso a resultados publicados y sin publicar. Los estadounidenses, en cambio, tenían normalmente que esperar al menos un mes más hasta que podían leer los artículos de las revistas de física alemanas. El espíritu competitivo en mecánica cuántica de la época quedó expresado por John Slater quien, en una carta a Bohr en mayo de 1926, escribía algo amargamente sobre su frustración al verse superado en la carrera de las publicaciones: «Es muy difícil trabajar aquí en los Estados Unidos sobre cosas que están cambiando tan rápido como ésta [mecánica cuántica], porque tardamos más en oír lo que se está haciendo, y cuando por fin nos ponemos, es probable que alguien en Europa ya haya hecho lo mismo» (Kragh 1990, p. 21).

Pauli se refirió una vez a la mecánica cuántica como *Knabenphysik*, física de chavales, porque muchos de los principales actores eran todavía veinteañeros. Por ejemplo, en septiembre de 1925 Heisenberg tenía 23 años, Pauli 25, Jordan 22 y Dirac acababa de cumplir 22. Más de la mitad de la primera generación de físicos cuánticos, es decir, los ochenta físicos, más o menos, que contribuían a la mecánica cuántica en ese periodo, nacieron después de 1895, y escribían aproximadamente el 65 por 100 de todos los artículos. Muchos de estos brillantes físicos pensaban, arrogantemente, que la mecáni-

ca cuántica les pertenecía y que la mayor parte de los físicos mayores eran simplemente incapaces de dominar la teoría. «Era muy difícil no quedarse senil después de haber vivido treinta años», recordaba Friedrich von Weizsäcker, en 1932 un miembro de veintidós años de la pandilla de físicos de nueva generación. «Sentía que la actitud general era simplemente una actitud de [...] un inmenso "Hochmut", un inmenso sentimiento de superioridad, comparado con los viejos catedráticos de física teórica, con todos los físicos experimentales, con todos los filósofos, los políticos y con todo tipo de gente que pudieras encontrar en el mundo, porque nosotros habíamos comprendido el asunto y ellos no sabían de qué hablábamos» (Kragh 1996b, p. 89). Según queda patente en la tabla 11.2, Alemania y sus países colindantes dominaban la primera fase de la mecánica cuántica. Fueran los físicos cuánticos alemanes o no, el lenguaje principal de la mecánica cuántica era el alemán. La revista más importante era *Zeitschrift für Physik*, en la cual muchos físicos no alemanes publicaron sus resultados y que incluyó sesenta y ocho artículos sobre mecánica cuántica entre julio de 1925 y marzo de 1927. Es también destacable la débil posición de Francia, donde la mecánica cuántica tan

TABLA 11.2
Publicaciones y autores de mecánica cuántica, de julio 1925 a marzo 1927

País	*Número de autores*	*Artículos escritos por ellos*	*Artículos escritos en el país*	*Artículos publicados en el país*
Alemania	19	59,5	54	120
Suiza	5	17	21	0
Austria	5	7	6	0
Dinamarca	4	7	17	1
Países Bajos	2	4	5	1
Europa Central, total	35	94,5	103	122
Francia	2	12	12	14
Gran Bretaña	6	15	18	30
Estados Unidos	19	34,5	26	27
URSS	11	11	11	9
Italia	3	4	4	1
Suecia	2	6	5	0
Otros	3	5	3	0
Total	81	182	182	203

Nota: Las primeras dos columnas no se refieren a las nacionalidades de los autores sino dónde permanecieron la mayoría del tiempo en el periodo. El número de artículos de la columna 2 incluye artículos y recensiones originales, pero no traducciones ni notas preliminares, que están incluidas en la columna 4. La columna 3 muestra el efecto de los visitantes extranjeros. *Fuente:* Basado en datos en Kojevnikov y Novik 1989.

sólo se había diseminado lentamente y sin producir contribuciones de gran importancia. La única aportación francesa a la literatura de la mecánica cuántica de la época fue la de Louis de Broglie y Léon Brillouin.

Comparada con la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica se desarrolló rápidamente, se diseminó velozmente y apenas encontró resistencia. También al contrario que la relatividad, la mecánica cuántica atrajo escaso interés público. Eddington era uno de los pocos científicos que escribió acerca de la teoría para lectores no científicos. Aunque la mecánica cuántica no era menos antiintuitiva que la relatividad, no existía contrapartida cuántica a la literatura antirrelativista que floreció en los años veinte. La rápida diseminación científica tuvo lugar no sólo por la publicación de artículos, sino mediante visitas docentes, artículos de recensión, libros de texto y cursos académicos sobre mecánica cuántica. El primer libro de texto dedicado específicamente a la mecánica cuántica parece haber sido *The New Quantum Mechanics* del físico de Cambridge George Birtwistle. Publicado en 1928, el libro proporcionaba un detallado examen de las principales contribuciones a la mecánica matricial y ondulatoria, desde la teoría de ondas de materia de De Broglie en 1923 hasta el principio de complementariedad de Bohr. Otros monográficos pioneros incluían *Materiewellen und Quantenmechanik* de Arthur Haas (1928), *Gruppentheorie und Quantenmechanik* de Weyl (1928), el suplemento sobre mecánica ondulatoria de *Atombau und Spektrallinien* de Sommerfeld (1929), *Quantum Mechanics* de Edward Condon y Philip Morse (1929) y *Elementare Quantenmechanik* de Born y Jordan (1930). Este último libro, que se basaba en métodos abstractos de mecánica matricial en vez de la más fácilmente aplicable mecánica cuántica, no fue un éxito. El libro más influyente de los primeros libros sobre mecánica cuántica fue sin duda *The Principles of Quantum Mechanics* de Dirac en 1930, el cual, a pesar de ser abstracto y en general poco pedagógico, tuvo un enorme éxito. Se imprimieron varias ediciones y traducciones, y se convirtió en el trabajo de referencia sobre mecánica cuántica en los años treinta.

Mientras que la vieja teoría cuántica no se había cultivado demasiado entre los físicos estadounidenses, la nueva mecánica cuántica se recibió entusiasta y positivamente en una comunidad física en fuerte crecimiento. Durante la última mitad de los años veinte, la física estadounidense maduró y ascendió a una posición principal en la física mundial. Por ejemplo, el número de miembros y miembros honorarios de la Sociedad Americana de Física se incrementó rápidamente, de unos 1.100 en 1920 a 1.800 en 1926 y 2.400 en 1930. *Physical Review* creció de manera correspondiente, tanto en tamaño como en importancia. En 1929 las 2.700 páginas se distribuían en 281 artículos, de los cuales unos 45 se dedicaban a aspectos de la mecánica cuántica. Por aquel entonces, se sentía la necesidad de recensiones más amplias, por ejemplo de mecánica cuántica, y el resultado fue el lanzamiento en 1929 de *Reviews of Modern Physics*, cuyos primeros dos números aparecieron como *Physical Review Supplement.* Entre los primeros artículos de recensión estaba «The General Principles of Quantum Mechanics» de Edwin Kemble y Edward Hill, que cubría tanto la mecánica matricial como la ondulatoria en más de 100 páginas. Una importante razón para la rápida y fácil recep-

ción de la mecánica cuántica en los Estados Unidos eran los viajes a Europa que hacían jóvenes físicos estadounidenses y las visitas a universidades de Estados Unidos que hacían físicos cuánticos europeos. A finales de los años veinte, más de treinta estadounidenses estudiaron en centros de física teórica europeos, de los cuales Gotinga, Múnich, Zurich, Copenhague y Leipzig eran los más populares. Las visitas y giras académicas de físicos europeos se hicieron comunes e incluyeron pioneros como Sommerfeld, Born, Heisenberg, Dirac, Kramers, Hund y Brillouin. Las clases de Born en el Massachusetts Institute of Technology y en otras universidades de Estados Unidos durante 1925-1926 fueron de especial importancia, porque introdujeron la mecánica cuántica a los físicos estadounidenses en un momento en el que la teoría todavía se estaba completando.

La última parte de los años veinte fue testigo de un notable giro en la estructura interna de la física, desde el trabajo experimental al teórico. Mientras que en 1910 sólo sobre el 20 por 100 de la literatura mundial de física consistía en artículos que eran sobre todo teóricos, en 1930 el porcentaje estaba cerca de 50. El giro era una tendencia mundial, causada claramente por la mecánica cuántica, pero fue particularmente importante en los Estados Unidos, donde la teoría se había cultivado tradicionalmente menos que en Europa. Aunque ningún estadounidense participara en la fase creativa de la mecánica cuántica, rápidamente se pusieron al día y contribuyeron de manera importante a la segunda fase. Entre la primera generación de los físicos cuánticos estadounidenses estaban Carl Eckart, John Slater, John van Vleck, David Dennison, Robert Oppenheimer y el químico Linus Pauling. Como la mayor parte de los demás miembros de la primera generación de físicos cuánticos, trabajaban principalmente en los aspectos teóricos de la mecánica cuántica.

Muchos físicos europeos se ocuparon con profundidad de las implicaciones filosóficas de la nueva mecánica y dedicaron mucho tiempo a discutir el significado general de las extrañas características no clásicas de la teoría. ¿Empiezan a existir las propiedades físicas sólo como resultado de las medidas? Si es así, ¿es el mundo observado real y objetivo? ¿Se pueden distinguir objeto y sujeto o forman un todo indisoluble? ¿Pueden extrapolarse las lecciones de la mecánica cuántica a la sociedad y la cultura? Para Bohr, Einstein, Heisenberg, Jordan y otros, era tan importante entender estas características como calcular problemas físicos con la nueva técnica. La actitud de los estadounidenses era claramente diferente. Aunque existía un considerable interés entre los estadounidenses acerca de problemas fundamentales, por ejemplo en la correcta formulación del principio de incertidumbre, no les importaban demasiado los elevados problemas filosóficos asociados con la mecánica cuántica. Éstos, sencillamente, no aparecían en los artículos y libros publicados por físicos estadounidenses, cuya actitud era pragmática e inspirada por el operacionalismo postulado en *Logic of Modern Physics* de Bridgman. De acuerdo con esta actitud, los resultados experimentales era lo único que importaba y que tenía sentido discutir; el trabajo de los físicos cuánticos era por tanto realizar cálculos que pudieran comprobarse experimentalmente. Los puntos de vista filosóficos (o quizás antifilosóficos) de Slater, como los expresó en 1937, eran aceptados por la gran mayoría de los físicos estadounidenses:

> Un físico teórico en estos días pide sólo una cosa de sus teorías: si las utiliza para calcular el resultado de un experimento, la predicción teórica debe estar de acuerdo, dentro de ciertos límites, con este resultado. Por lo general, no argumenta acerca de las implicaciones filosóficas de su teoría [...] Las preguntas sobre una teoría que no afectan su habilidad de predecir correctamente resultados experimentales me resultan cavilaciones sobre las palabras, más que algo más sustancial, y estoy bastante satisfecho de dejar estas cuestiones a aquellos que deriven de ellas alguna satisfacción. (Schweber 1990, p. 391).

El espíritu de Copenhague (es decir, el principio de complementariedad de Bohr y las interpretaciones relacionadas de los procesos cuánticos) dejaba tan fríos a los estadounidenses como emocionados a muchos físicos continentales. Por supuesto, la falta de interés en el principio de complementariedad no era exclusiva de los estadounidenses, pero lo mucho que los físicos de Estados Unidos ignoraban la filosofía de Bohr (incluyendo a los que habían visitado a Bohr en Copenhague) es, a pesar de todo, notable. «No me agradaba del todo», recordaba Dirac en 1963 acerca del principio de complementariedad, y explicaba que «no te proporcionaba ninguna ecuación que no tuvieras ya» (Kragh 1990, p. 84). Para Dirac, esto era suficiente para que la idea le desagradara, y sus colegas de Estados Unidos solían estar de acuerdo.

Cuando llegó la mecánica cuántica, la física teórica estaba esencialmente limitada a Europa y América del Norte. La física moderna llegó tarde a Japón, donde despegó tan sólo en los años treinta. El pionero japonés fue Yoshio Nishima, un físico que pasó la mayor parte de los años veinte en Europa en una visita prolongada que incluyó seis años en Copenhague con Bohr. La mecánica cuántica se introdujo en parte mediante clases impartidas por occidentales, incluyendo a Otto Laporte, Sommerfeld, Dirac y Heisenberg. A partir de la primavera de 1931, Nishima impartió clases sobre mecánica cuántica en la Universidad de Kioto, utilizando el nuevo libro de Heisenberg, *Die physikalische Prinzipien der Quantentheorie,* y más tarde *Principles of Quantum Mechanics* de Dirac. Los esfuerzos de Nishima fueron cruciales para la creación de la potente escuela de física cuántica teórica que emergería en Japón a finales de los años treinta.

CAPÍTULO 12

El surgimiento de la física nuclear

El modelo electrón-protón

Poco después de que se aceptara el modelo nuclear de la estructura atómica, varios físicos comenzaron a especular sobre la estructura del minúsculo núcleo atómico. El punto de vista general era el propuesto por Rutherford, es decir, que el núcleo se componía de electores y de partículas unitarias con carga positiva, estas últimas idénticas al núcleo del hidrógeno y frecuentemente denominadas «electrones positivos» o partículas *H*; o, a partir de 1920, protones. Parecía evidente que el núcleo contenía electrones, porque las partículas positivas necesitaban claramente alguna electricidad negativa que impidiera que el núcleo estallara. Además, se sabía desde 1913 que los electrones beta tenían su origen en el núcleo y no en las capas de electrones exteriores. Esto mismo había sido argumentado, entre otros, por Bohr, quien en su obra de 1913 señalaba que «el hecho de que dos elementos aparentemente idénticos [isótopos] emitan partículas β a distintas velocidades, muestra que los rayos β, además de los rayos α, tienen su origen en el núcleo» (Bohr 1963, p. 53).

De acuerdo con el modelo atómico nuclear, el número másico A y el número atómico Z deberían depender del número de protones (p) y electrones (e) de la forma $A = p$ y $Z = p - e$. Por otro lado, los núcleos de cuerpos radiactivos también producían partículas alfa, que por tanto también se suponían constituyentes nucleares adicionales. Para un núcleo con a partículas alfa, la ecuación sería $A = 4a + p$ y $Z = 2a + p - e$. Esta hipótesis gozó de amplia aceptación entre 1915 y 1932. De hecho, ni un sólo físico parece haber dudado de la hipótesis de electrones nucleares y lo que se ha denominado acertadamente el paradigma de las dos partículas, es decir, que toda la materia consistía en electrones y protones (si bien algunas veces en formas ligadas, como partículas alfa u otras combinaciones). Entonces ¿cómo se disponían las dos o tres especies nucleares en el núcleo? Dada la casi total ausencia de evidencia experimental, era una tarea imposible construir modelos nucleares fiables en los años diez y veinte. Sin

embargo, un número sorprendentemente alto de físicos (y de químicos también) no se amilanaron ante las dificultades y especularon más o menos libremente sobre las estructuras nucleares. La mayoría de estos modelos eran puramente especulativos, frecuentemente basados en vagos argumentos numerológicos, pero unos pocos eran de naturaleza más seria. Por ejemplo, en 1918 el físico de Múnich Wilhelm Lenz construyó un modelo de una partícula alfa de acuerdo a las leyes de la teoría cuántica, es decir, cuatro protones girando en un plano ecuatorial con un electrón en cada polo. Sommerfeld se refirió positivamente a este modelo en su *Atombau*.

El más eminente de los físicos nucleares de la primera generación fue también el más prolífico de los hacedores de modelos, y no el menos especulativo. Inspirado en sus experimentos anteriores de esparcimiento alfa, Rutherford sugirió en su clase bakeriana de 1920 que podrían existir otras partículas en el núcleo distintas de los electrones, alfas y protones. Rutherford argumentó que existía la evidencia de un núcleo de helio ligero, que consistía en tres protones ligados por un electrón ($X^{+}{}_{3}{}^{+}$ según la notación de Rutherford), y quizá también de un isótopo pesado del hidrógeno, formado por dos protones y un electrón; y –¿por qué no?– el núcleo también contenía una partícula neutra compuesta de un protón y un electrón, un «neutrón», de acuerdo a Rutherford. También fue en esta ocasión cuando Rutherford introdujo el nombre «protón». Rutherford estaba fascinado en particular por la posibilidad de los neutrones, ya que éstos «entrarían fácilmente en la estructura de los átomos, y podrían o bien unirse al núcleo o bien desintegrarse por el fuerte campo de éste, dando lugar posiblemente al escape de un átomo *H* cargado [protón] o de un electrón o de ambos» (Badash 1983, p. 886). Puede que Rutherford no fuera consciente de que sus «neutrones» habían sido propuestos ya en 1899 por el físico australiano William Sutherland, quien sugirió que el éter consistía en dobletes de electrones positivos y negativos. La sugerencia de Sutherland fue asumida por Nernst en su fidedigno libro de texto *Theoretical Chemistry,* donde apareció en todas sus ediciones entre 1903 y 1926. Mientras que la idea de los átomos ligeros de helio se basaba en una endeble evidencia experimental y se abandonó en 1924, la hipótesis del neutrón gozó de una larga vida y se tomó bastante en serio en Cambridge. James Chadwick creía en su existencia tanto como Rutherford, e intentó en varias ocasiones detectar la hipotética partícula durante los años veinte. No lo consiguió hasta 1932, y entonces resultó que después de todo la partícula neutra observada no era el neutrón de Rutherford. Rutherford continuó desarrollando sus ideas sobre la estructura atómica, y en 1925 llegó a la conclusión de que el núcleo consistía en un centro enorme rodeado de satélites positivos y negativos (protones y electrones). Consideró su modelo de satélites lo bastante importante como para incluirlo en *Radiations from Radioactive Substances,* escrito junto con Chadwick y Charles D. Ellis y publicado en 1930.

La mayoría de las hipótesis de Rutherford se basaban en interpretaciones de experimentos en los que se bombardeaban sustancias con partículas alfa. En diciembre de 1917 escribió a Bohr, «estoy detectando y contando los átomos ligeros puestos en movimiento por partículas α y los resultados, yo creo, iluminan bastante el carácter y distribución de

fuerzas cerca del núcleo. También estoy intentando romper el átomo mediante este método» (Stuewer 1986a, p. 322). El más importante de estos experimentos se llevó a cabo en Manchester en 1919, poco antes de que Rutherford partiera hacia Cambridge para ser director del laboratorio Cavendish. En una reinvestigación de experimentos realizados anteriormente por Ernest Marsden, Rutherford estudió la acción de las partículas alfa sobre varios gases, detectando los escintilaciones producidas por las partículas de largo alcance formadas por la acción. Con nitrógeno puro, observó lo que denominó un efecto anómalo: la producción de partículas de largo alcance similares a las obtenidas con hidrógeno. «Es difícil evitar la conclusión», escribió, «de que estos átomos de largo alcance que surgen a partir de la colisión de partículas alfa con nitrógeno no sean átomos de nitrógeno sino probablemente átomos cargados de hidrógeno, o átomos de masa 2. Si este fuera el caso, debemos concluir que el átomo de nitrógeno se desintegra bajo las intensas fuerzas que se crean en una colisión de corto alcance con una partícula α rápida, y que el átomo de hidrógeno que se libera formaba una parte constituyente del núcleo del nitrógeno» (Beyer 1949, p. 136). La conclusión de Rutherford era en su mayor parte correcta, como quedó probado por trabajos adicionales en el Cavendish. Había conseguido la primera desintegración artificial de un núcleo atómico y así había abierto una nueva etapa en la historia de la alquimia moderna. El proceso era $^{14}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{17}O + {}^{1}H$, aunque Rutherford lo interpretó al principio como $^{14}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + {}^{1}H$. Sólo se corrigió el error en 1924, cuando las fotografías de la cámara de niebla no mostraron ninguna traza de partículas alfa provenientes de los átomos bombardeados.

Durante los años siguientes, Rutherford y su equipo del Cavendish continuaron este tipo de experimentos con la esperanza de transformar aún más elementos. En el Instituto del Radio de Viena se realizaba un trabajo similar, pero con distintos resultados. Mientras que Rutherford y Chadwick no encontraron evidencia de la desintegración de elementos más pesados que el potasio, ni para el berilio y el litio, los físicos de Viena Gerhard Kirsch y Hans Petterson (este último, sueco) mantenían haber tenido mucho más éxito desintegrando elementos. No sólo dieron a conocer resultados muy distintos de los producidos en Cambridge, sino que también atacaron el modelo nuclear de satélites de Rutherford. El desacuerdo se convirtió en una prolongada controversia con algunos componentes iguales a los que caracterizaron al famoso episodio de los rayos N a principios de siglo. Como resultado de una visita que Chadwick realizó al Instituto de Viena en 1927, encontró que el equipo austro-sueco no controlaba sus resultados y que el recuento de escintilaciones estaba sistemáticamente desplazado hacia los valores (demasiado) elevados que deseaban encontrar. Según un historiador, «el recuento lo realizaban mujeres; el razonamiento era que ellas se podían concentrar en la tarea más intensamente que los hombres, ya que en todo caso tampoco tenían mucho en sus cabezas; mujeres eslavas, por sus ojos grandes y redondos, más adecuados para contar. A las mujeres se les decía qué ritmo de recuento era el anticipado y, ansiosas por agradar, lo proporcionaban» (Badash 1983, p. 887).

La física nuclear en los años veinte estaba íntimamente ligada a la radiactividad y la única fuente de proyectiles de altas energías eran las partículas alfa y beta emitidas por

sustancias radiactivas que se daban en la naturaleza. Para medir la intensidad y dirección de las partículas, fueran éstas esparcidas o producidas por desintegración, normalmente se utilizaban sencillos aparatos de escintilaciones. El recuento visual de escintilaciones se remontaba a 1908, cuando Erich Regener, de la Universidad de Berlín, concluyó que cada partícula alfa que incidía sobre una pantalla fosforescente producía una escintilación. El sencillo método se utilizó extensivamente hasta principios de los años treinta. El experimento de Rutherford en 1919 no utilizó aparatos más avanzados que los que utilizaran Geiger y Marsden en sus experimentos de esparcimiento alfa aproximadamente diez años antes. La falta de dinero y de tecnología disponible hacía que los experimentos del Cavendish fueran sencillos y de acuerdo con la predilección personal de Rutherford por los métodos rudimentarios; sin embargo, no todos los métodos eran rudimentarios. Uno de los instrumentos más importantes en la infancia de la física nuclear fue el espectrógrafo de masas electromagnético, desarrollado por Francis Aston a partir de su primera versión en 1919. A finales de los años veinte, el espectrógrafo de masa se había convertido en un complicado y caro instrumento.

La cámara de niebla empezó a desempeñar un papel importante para los propósitos de detección en los años veinte. El principio de hacer visibles las trazas de gotitas ionizadas mediante una expansión súbita fue descubierto por Charles T. R. Wilson en el laboratorio Cavendish a finales de la década de 1890, en conexión con estudios meteorológicos. En 1911, Wilson concluyó la construcción de la primera cámara de niebla para estudiar las trayectorias de partículas ionizadas y tomó la primera fotografía de cámara de niebla. En 1921 T. Shimizu, un físico japonés que trabajaba en el Cavendish, encontró una manera de operar la cámara automáticamente, y la técnica fue mejorada aun más por Patrick M.S. Blackett. Prácticamente todo el trabajo innovador sobre escintilaciones y técnicas de cámara de niebla se llevó a cabo en el laboratorio Cavendish, que también fue el lugar donde nacieron las cámaras, o contadores, de ionización de gas. La versión más efectiva de los primeros contadores de ionización fue diseñada por Hans Geiger en 1913. Cuando la guerra estalló, Geiger regresó a Alemania para servir en la artillería; tras 1918, prosiguió su trabajo en contadores de ionización. El contador Geiger-Müller, moderno y altamente sensible, fue un invento alemán. Fue desarrollado en 1928 por Geiger y su colaborador en la Universidad de Kiel, Walther Müller. El desarrollo en métodos de detección en la década de los veinte y posterio debía mucho a la ingeniería electrónica, especialmente el uso de circuitos de válvulas de vacío.

La mecánica cuántica y el núcleo

La mecánica cuántica era una teoría general de los átomos y electrones. También se suponía válida para el núcleo atómico pero, durante la primera fase de la mecánica cuántica, no existieron intentos de aplicar la nueva teoría a la física nuclear. La situación cambió en verano de 1928, cuando se reveló que la radiactividad alfa podía entenderse en términos de mecánica cuántica. La importante teoría mecánico-cuántica de la desintegración alfa fue propuesta independientemente por George Gamow en

Gotinga y Ronald Gurney y Edward Condon en Princeton. Gamow, un físico ruso de veinticuatro años, argumentó (como antes hiciera Rutherford) que el potencial nuclear debe ser fuertemente atractivo a distancias muy cortas y alcanzar una altura máxima antes de fundirse con el potencial repulsivo de Coulomb. En su imagen, las partículas alfa ya existen en el núcleo, vibrando u orbitando alrededor del pozo de potencial. Clásicamente, la partícula alfa no sería capaz de penetrar el potencial pero, de acuerdo a la interpretación de Born de la mecánica ondulatoria de Schrödinger, existiría una probabilidad finita de que una partícula escapara del núcleo con una energía menor que la altura máxima del potencial. Éste es el famoso caso de una partícula u onda de material atravesando una barrera de potencial por «efecto túnel», un caso que hoy en día aparece en todo libro de introducción a la mecánica cuántica, pero que en 1928 era un nuevo y excitante fenómeno.

Gamow consiguió, utilizando la mecánica cuántica, encontrar la probabilidad de penetración y, después de traducirla como la constante de desintegración, derivar una relación lineal entre el logaritmo de esta constante y la energía de las partículas alfa emitidas. Esta relación era justamente la de Geiger-Nuttal, que se conocía empíricamente desde el trabajo de Geiger y el físico inglés John Nuttal en 1912. Existían derivaciones anteriores de la ley de Geiger-Nuttal, por ejemplo la de Frederick Lindemann en 1915, pero eran pseudoexplicaciones basadas en suposiciones *ad hoc*. La explicación de Gamow, al igual que la propuesta por Gurney y Condon, en gran parte idéntica, era mucho más satisfactoria porque se basaba en una teoría fundamental. La teoría de Gamow-Gurney-Condon fue extremadamente importante, tanto porque proporcionó una convincente demostración de que la mecánica cuántica es aplicable al núcleo atómico como porque conformó el cimiento de otras aplicaciones de la mecánica cuántica a la física nuclear.

La naturaleza estadística de la radiactividad había sido un enigma desde que se reconociera en la primera parte del siglo. Se intentó en numerosas ocasiones proporcionar una explicación causal del origen de la radiactividad, pero fue sólo con la mecánica cuántica cuando quedó claro que estos intentos de entender la naturaleza estadística de la radiactividad eran fútiles. Como Gurney y Condon dijeron en 1929, refiriéndose a estos intentos: «Ha sido muy desconcertante el tiempo en que hemos aceptado una dinámica según la cual el comportamiento de las partículas está fijado de manera precisa por las condiciones. Hemos tenido que considerar que la desintegración se debía a la extraordinaria conjunción de decenas de sucesos independientes en los movimientos orbitales de las partículas nucleares. Ahora, en cambio, cargamos toda la responsabilidad sobre las leyes de la mecánica cuántica, reconociendo que el comportamiento de las partículas en todas partes está igualmente gobernado por la probabilidad» (Kragh 1997a, p. 357).

Durante los años que siguieron a 1928, la mecánica cuántica se aplicó con éxito a otros problemas que involucraban núcleos atómicos, entre los cuales los problemas de colisión eran particularmente importantes. Por ejemplo, en 1928 Nevill Mott, un físico de Cambridge de veintitrés años, reprodujo la expresión de Rutherford de 1911 para

la dispersión de partículas cargadas por un núcleo puntual. Más interesante fue que, para colisiones entre dos partículas idénticas (como partículas alfa esparcidas por helio gaseoso) predijo un resultado distinto al de Rutherford: que para bajas velocidades el esparcimiento en un ángulo de 45 grados ocurriría con una frecuencia que sería aproximadamente el doble de la esperada clásicamente. La predicción, confirmada mediante experimentos de Patrick Blackett y Frank Champion con cámara de niebla en 1931, fue una de las primeras predicciones de la mecánica cuántica en el régimen nuclear.

Los trabajos de Gamow, Mott y Gurney y Condon no iluminaron ningún aspecto nuevo sobre la estructura del núcleo, que todavía se suponía compuesto de electrones y protones. Éstas eran las únicas partículas elementales conocidas y, además, los núcleos radiactivos emitían electrones en forma de partículas beta. Por otro lado, durante el final de los años veinte, se fue gradualmente llegando a la conclusión de que, de algún modo, los electrones no deberían tener cabida en el núcleo atómico. Eran necesarios, pero no bienvenidos. Uno de los problemas del modelo de electrones y protones es que no estaba de acuerdo con las estadísticas nucleares determinadas experimentalmente. Los estudios sobre el especto rotacional de la molécula N_2^+ indicaban que el espín del núcleo de nitrógeno debía ser igual a uno. Pero si el núcleo consistía en 14 protones y 7 electrones, un número impar de partículas con espín un medio, debía tener él mismo espín un medio. La discrepancia entre medidas y expectativas teóricas fue señalada por Ralph Kronig, que sugirió en 1928 que «probablemente uno se ve por tanto forzado a suponer que los protones y electrones no conservan su identidad hasta el punto en que lo hacen fuera del núcleo» (Pais 1986, p. 301). Ni Kronig ni otros podían ser más concretos en ese momento. Al año siguiente, estudios de espectros Raman confirmaron el resultado de que el núcleo del nitrógeno seguía la estadística de Bose-Einstein, es decir, tenía espín entero. En Gotinga, Walter Heitler y Gerhard Herzberg ampliaron la conclusión de Kronig: «Parece como si el electrón en el núcleo perdiera, junto con su espín, también su derecho a la participación en la estadística del núcleo» (*ibid.*, p. 302).

Incluso de mayor importante que la anomalía del nitrógeno era el problema de entender el espectro beta. En 1914 Chadwick había hallado que el espectro de la radiactividad beta era continuo, aunque mezclado con un espectro de líneas. De acuerdo a Chadwick y los físicos del Cavendish, el espectro continuo era el real, mientras que las líneas discretas tenían su origen en, por ejemplo, un efecto fotoeléctrico interno al sistema electrónico, como propuso Charles Ellis en 1922. Sin embargo, era posible explicar el espectro sin suponer que los electrones beta se emitieran con energías en una gama continua. En Berlín, Lise Meitner sugirió que los electrones comenzaban con la misma energía pero que algo de ella se transformaba en radiación gamma, lo que produciría rayos beta secundarios. La alternativa propuesta por Meitner condujo a una prolongada controversia con los científicos del Cavendish. La controversia quedó zanjada sólo a finales de los años veinte, cuando los experimentos demostraron ser incompatibles con la teoría de Meitner. Quedó entonces firmemente establecido que el espectro beta continuo tenía su origen en el núcleo. Esta conclusión, sin embargo, era

muy incómoda desde un punto de vista teórico. De acuerdo a la mecánica cuántica, un núcleo puede existir sólo en estados discretos de energía; asumiendo la conservación de la energía, una desintegración de dos partículas produciendo un núcleo hijo y un electrón beta no puede, por tanto, reproducir el espectro continuo.

Junto con el problema de la estadística de espín y los problemas asociados a la mecánica cuántica relativista, el espectro beta continuo llevó a una especie de crisis en parte de la comunidad física entre 1929-1931. La respuesta de Niels Bohr a la crisis fue radical: la conservación de la energía fallaba en la desintegración beta. En una nota sin publicar de junio de 1929 enfatizaba «qué poca base poseemos en este momento para un tratamiento teórico del problema de las desintegraciones β». Continuaba, «En efecto, el comportamiento de los electrones ligados en un núcleo atómico parece quedar totalmente fuera del campo de las aplicaciones consistentes de los conceptos mecánicos ordinarios, incluso en su modificación mecánico-cuántica. Recordando que los principios de conservación de la energía y del momento son de origen puramente clásico, la sugerencia de su incapacidad para explicar la emisión de rayos β puede apenas rechazarse de antemano dado el estado actual de la teoría cuántica». Bohr continuó abogando por la violación de la conservación de la energía durante al menos tres años; recibió el apoyo de algunos de los físicos más jóvenes, incluyendo Gamow y Landau. Gamow fue el autor del primer libro de texto que se escribió sobre física nuclear en su sentido moderno: un libro titulado *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity* y con fecha en el prefacio de 1 de mayo de 1931. Por aquel entonces, la física nuclear era un campo recién nacido. El libro, enfocado a proporcionar «una descripción lo más completa posible de nuestro conocimiento experimental y teórico de la naturaleza de los núcleos atómicos», tenía 114 páginas. Gamow se refería con aprobación a la idea de Bohr sobre la no conservación de la energía y escribía, en completo acuerdo con su maestro en Copenhague, «las ideas habituales de la mecánica cuántica fracasan de manera absoluta al intentar describir el comportamiento de los electrones nucleares; parece que quizá no puedan tratarse siquiera como partículas individuales, y también el concepto de energía parece perder su significado» (p. 5).

Pauli no estaba menos preocupado que Bohr y Gamow, pero no quería tener nada que ver con la no conservación de la energía. En diciembre de 1930 propuso, en una «carta abierta» a Meitner y Geiger, que el enigma beta además del problema del N-14 podría resolverse introduciendo en el núcleo una partícula neutral nueva: «[Se da] la posibilidad de que puedan existir en el núcleo partículas eléctricamente neutras que denominaré neutrones, con espín 1/2 y que obedecen al principio de exclusión, y que además difieren de los cuantos de luz en que no viajan a la velocidad de la luz: la masa del neutrón debe ser del mismo orden de magnitud que la del electrón y, en cualquier caso, nunca mayor que 0,01 la masa del protón. El espectro β continuo podría entenderse entonces mediante la suposición de que en la desintegración β se emite un neutrón junto con el electrón, de tal manera que la suma de las energías del electrón y el neutrón son constantes» (Brown 1978, p. 27). Pauli dudó si publicar su idea que, en todo caso, era bien conocida en la comunidad física. Sólo en 1933, en una discusión en

el séptimo congreso de Solvay, defendió públicamente la hipótesis, que apareció impresa en los anales publicados en 1934. Por aquel entonces, el «neutrón pesado» había sido descubierto y Enrico Fermi propuso denominar a la partícula de Pauli «neutrino». Como queda claro en su carta a Meitner y Geiger, Pauli pensaba al principio que el neutrino formaba parte del núcleo y que aportaba una masa pequeña pero no nula y también un momento magnético: de acuerdo a esta imagen, el núcleo consistía en protones, electrones y neutrinos. El neutrino hipotético de Pauli rompía el paradigma de las dos partículas y era revolucionario en este sentido ontológico. Desde un punto de vista metodológico, en cambio, se trataba de una teoría conservadora, ya que toda su razón de ser era preservar las leyes de conservación tan bien comprobadas.

El neutrino encontró resistencia o indiferencia al principio. Entre los antagonistas estaba Bohr y, entre los defensores, Fermi. Fue sólo después de la exitosa teoría de la desintegración beta de Fermi en 1934 cuando el neutrino adquirió cierto respeto, pero todavía se trataba de una partícula hipotética y se suponía generalmente que no podía detectarse. En un artículo en *Nature* en abril de 1934, Hans Bethe y Rudolf Peierls concluían que «no existe prácticamente ninguna manera posible de detectar el neutrino». Incluso en 1936, Dirac seguía rechazando al neutrino y prefería la alternativa de la no conservación de la energía. El neutrino desempeñó un papel no sólo en la teoría beta sino también en los intentos de entender fenómenos electromagnéticos en términos de teoría nuclear. En 1934 Louis de Broglie sugirió que el fotón podría concebirse como el par de un neutrino y un antineutrino. Su idea despertó mucho interés entre los físicos teóricos: durante el periodo de 1934-1938 se desarrolló en distintas direcciones por, entre otros, Jordan, Kronig, Gregor, Wentzel y Ernst Stueckelberg. Sin embargo, los muchos artículos sobre este tema no consiguieron establecer conexiones con los experimentos y no condujeron a una teoría de la luz satisfactoria basada en los neutrinos. En 1940 la teoría fue prácticamente abandonada, no porque se hubiera probado que fuera falsa, sino porque quedó probado que no producía frutos.

El modelo de Pauli de protón-electrón-neutrino era sólo uno de los varios intentos especulativos de entender el núcleo atómico de una nueva manera. En 1930 los físicos rusos Dmitri Iwanenko y Victor Ambarzumian sugirieron una teoría de la desintegración beta basada en la nueva teoría del electrón de Dirac. Según los rusos, el electrón beta no existiría con anterioridad en el núcleo, sino que se crearía allí junto con un protón a partir de un electrón en un estado energético negativo.

Otra hipótesis efímera más fue sugerida por Heisenberg más o menos a la vez, en una carta a Bohr. Mediante la concepción del mundo como una red *(Gitterwelt)* con celdas de longitud h/Mc^3, siendo M la masa del protón, Heisenberg argumentaba que podía interpretar el núcleo como si consistiera en protones y lo que él denominó «cuantos de luz pesados». La ventaja del modelo era que evitaba electrones nucleares y la desventaja (entre otras) que violaba la mayor parte de las leyes de conservación, incluyendo la de la carga. «No sé si considerará este intento radical completamente absurdo», escribió a Bohr, «pero tengo la sensación de que la física nuclear no nos va a costar menos que esto» (Carazza y Kragh 1995, p. 597). Bohr estaba de acuerdo con

que las paradojas de la física nuclear requerían drásticos cambios en la teoría, pero encontró la hipótesis del mundo reticular, si no totalmente absurda, sí demasiado absurda. Tras ser discutida la idea en Copenhague, Heisenberg la archivó, para retomar la hipótesis sobre una longitud fundamental posteriormente en los años treinta. En 1932 encontró otro candidato más aceptable para las partículas nucleares pesadas: el neutrón.

Aplicaciones astrofísicas

La física nuclear, o mejor dicho, las especulaciones nucleares, llegaron a la astronomía muy pronto. El nuevo conocimiento sobre la constitución atómica se utilizó en primer lugar en los intentos de entender uno de los misterios clásicos de la física: la producción de energía en el sol y en el resto de las estrellas. Ya en 1917, Arthur Eddington especulaba que la fuente de la energía podría ser la aniquilación de electrones y protones para producir energía de radiación. Este hipotético proceso fue muy discutido en la astronomía durante más de una década; después de todo, aunque no existía evidencia experimental del proceso, tampoco existían buenas razones por las que no debiera ocurrir en el interior de las estrellas. Como posible alternativa, Eddington sugirió en 1920 que la energía podría provenir de la formación de helio a partir de cuatro átomos de hidrógeno, es decir, un proceso de fusión. «Lo que es posible en el laboratorio Cavendish podría no ser demasiado difícil en el sol», fue su rotundo argumento, refiriéndose a los recientes experimentos nucleares de Rutherford. Eddington sabía que de acuerdo a las medidas de espectrografía de masas de Aston, la masa del núcleo de helio era casi del 1 por 100 menor que la de cuatro núcleos de hidrógeno, y que la reacción de formación estaría por tanto acompañada de una considerable producción de energía. Millikan era otro científico que aplicó la nueva física nuclear en su trabajo astrofísico, aunque en este caso su objetivo no era la energía estelar sino la radiación cósmica. En una serie de trabajos entre 1926 y 1930, el experimental estadounidense argumentó que los rayos cósmicos consistían en bandas diferenciadas de fotones con altas energías que se originaban en procesos de construcción nuclear en las profundidades del universo. Los rayos eran, según lo expresado por Millikan, «los gritos de los elementos al nacer» o «las señales enviadas a través del éter anunciando la continua creación de elementos más pesados a partir de los más ligeros» (Kragh 1996b, p. 147). Según Millikan, los procesos cósmicos de construcción atómica no tenían lugar paso a paso, sino en un único acto, en el cual se formaban elementos pesados directamente a partir de protones, electrones y partículas alfa. Esto podría parecer fantástico, pero era apenas más fantástico que la propuesta alternativa de James Jeans: que las estrellas consistían sobre todo en elementos transuránicos que se transformarían espontáneamente en radiación. Jeans sugirió que la transformación no ocurriría solamente mediante una desintegración radiactiva ordinaria, sino también mediante la aniquilación de núcleos atómicos enteros. Se sabía muy poco de procesos nucleares cósmicos en los años veinte, y la falta de conocimiento experimental provocó especulaciones.

Con la teoría mecánico-cuántica de Gamow de la desintegración alfa, empezó un capítulo nuevo, menos especulativo, en la astrofísica nuclear. El físico austriaco Fritz Houtermans y el astrofísico británico Robert d'Escourt Atkinson se encontraban realizando trabajos posdoctorales en Alemania. Se dieron cuenta de que el proceso de tunelación de Gamow se podría invertir y de esta manera quizá explicar la creación de elementos mediante reacciones nucleares. En 1929 los cálculos indicaron que la probabilidad de que las partículas alfa penetraran incluso en un núcleo ligero era despreciable bajo las condiciones que se suponía que existían en el interior de las estrellas. Se encontró que las reacciones protón-núcleo eran más prometedoras y Houterman y Atkinson, en colaboración con Gamow, derivaron una expresión general que relacionaba la sección eficaz de captura con la temperatura y el número atómico del núcleo penetrado. La teoría sugería que la fuente de la energía estelar podría ser la trasmutación de cuatro protones en una partícula alfa; es decir, el proceso que Eddington había sugerido originalmente. Según Houterman y Atkinson, sin embargo, el proceso no era la improbable colisión de cuatro partículas de Eddington, sino la captura consecutiva de protones por un núcleo ligero y la expulsión subsiguiente de una partícula alfa, y mientras que la sugerencia de Eddington no se basaba en ninguna teoría física, la teoría Houterman-Atkinson era cuantitativa y se basaba en el más reciente desarrollo en mecánica cuántica. La teoría se cuenta entre las contribuciones pioneras a la astrofísica moderna, pero al principio recibió poca atención.

La teoría de Houterman y Atkinson presuponía que el hidrógeno existía abundantemente en las estrellas, una suposición que ganó aceptación general entre los astrónomos solamente alrededor de 1930. Con el nuevo conocimiento del papel predominante del hidrógeno en las estrellas, Atkinson, que mientras tanto se había mudado a los Estados Unidos, proporcionó una versión muy expandida de la teoría en 1931. Sin los todavía desconocidos neutrones y deuterones, el helio no se podía construir directamente a partir de los protones, pero Atkinson diseñó un modelo cíclico en el cual el helio se formaba a partir de la desintegración de núcleos inestables. De este modo, intentó explicar la abundancia de toda la gama de elementos a partir de procesos de captura de protones. Sin embargo, fue sólo después de 1932, y especialmente tras la introducción del neutrón, cuando la astrofísica nuclear empezó a proporcionar resultados realmente prometedores. Atkinson, Gamow, Bethe y T. E. Sterne en los Estados Unidos, Harold Walke en Inglaterra, y Von Weizsäcker, Ladislaus Farkas y Paul Harteck en Alemania estaban entre los pioneros de la astrofísica nuclear en los años treinta. Es característico que los cuatro estadounidenses provinieran originalmente de Europa: Atkinson y Sterne de Inglaterra, Gamow de Rusia y Bethe de Alemania. La idea de que la formación estelar de los elementos se debía basar en la captura de neutrones se desarrolló independientemente por Walcke y Gamow en 1935. Los dos físicos se inspiraron en experimentos de laboratorio de la época, como los de Fermi en Roma y Cockcroft y Walton en Cambridge. Walke expresó la analogía entre procesos estelares y de laboratorio de esta manera: «El físico atómico, con sus fuentes de elevado potencial y sus tubos de descarga, está sintetizando elementos de la misma manera que ocurre en los

interiores estelares, y los procesos observados, que resultan en la liberación de tan gran cantidad de energía del orden de millones de voltios indican cómo se mantiene la intensa radiación de la estrellas y por qué sus temperaturas son tan altas» (Kragh 1996b, p. 92).

Las primeras ideas sobre procesos nucleares inducidos por neutrones no produjeron una explicación satisfactoria ni de la formación de los elementos ni de la producción de energía estelar. La importante clave en lo que concierne al segundo problema se encontró en 1938 y fue sobre todo un resultado de progreso en teoría nuclear. Hans Bethe, un antiguo estudiante de Sommerfeld y un experto en física cuántica y nuclear, había huido de Alemania en 1933 y se había asentado en la Universidad de Cornell. En 1938 participó en una conferencia sobre «Problemas de las fuentes de energía estelar» en Washington, D. C., a la que acudieron tanto astrónomos como físicos nucleares. Aunque no poseía conocimiento previo de astrofísica, Bethe utilizó su soberbio conocimiento de física nuclear para diseñar una teoría detallada de la producción de energía solar, que fue pronto reconocida como la cimentación de todo el trabajo posterior en el área. Una teoría menos detallada siguiendo las mismas líneas fue propuesta por Von Weizsäcker en 1938. La esencia de la teoría de Bethe era que cuatro protones se fusionaban en un núcleo de helio a través de un proceso cíclico, en el cual los núcleos de carbono actuaban como catalizadores. Al contrario que otras teorías anteriores, se basaba en detallados cálculos suplidos con valores de secciones determinadas experimentalmente. Los cálculos de física nuclear realizados por Bethe llegaban a la conclusión de que, para proporcionar la energía producida por el sol, el ciclo requeriría una temperatura central de 18,5 millones de grados Kelvin, un valor en excelente acuerdo con el que se calculaba mediante modelos astrofísicos del sol. La teoría de Bethe fue muy aplaudida tanto por astrónomos como por físicos. El comité del Nobel de Física en Estocolmo tardó algo más en reconocer su valor: veintiocho años, para ser exactos.

1932, *annus mirabilis*

En 1932, el neutrón era una partícula bien conocida, pero ausente. La literatura física de 1929-1931 contiene una docena de referencias o más al neutrón, pero se trataban todas de compuestos electrón-protón en el sentido de Rutherford. El neutrón verdadero se encontraría en la primavera de 1932 y aproximadamente un año más tarde se reconoció su carácter de partícula elemental. La serie de sucesos que conducirían al celebrado descubrimiento de Chadwick, por el cual conseguiría el premio Nobel tan sólo tres años más tarde, comenzó con experimentos en los años treinta realizados por Walther Bothe y Herbert Becker en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt en Berlín. Los dos físicos encontraron que el berilio expuesto a partículas alfa producía lo que ellos pensaban que eran rayos gamma energéticos. En París, Irène Curie y Frédéric Joliot examinaron la «radiación del berilio» e informaron a principios de 1932 de que esta radiación podía arrancar protones de parafina enriquecida con hidrógeno. Pensaron que el mecanismo podía ser algún tipo de efecto Compton. Al otro lado del Canal de la Mancha, en Cambridge, Chadwick era de otro parecer. El neutrón de Rutherford

ra cual fuera el correcto, el neutrón seguía siendo una partícula útil, ya que, como Chadwick explicó a los participantes del Solvay, se podía utilizar como proyectil en procesos nucleares. Como ejemplo, informó de que había observado cómo partículas alfa provenientes de neutrones reaccionaban con oxígeno según el proceso $^{1}n + {}^{16}O \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He$. Lo que convenció a los físicos de la naturaleza elemental del neutrón fueron, en parte, los nuevos desarrollos en teoría nuclear y, en parte, medidas más precisas de la masa del neutrón. Chadwick había obtenido originalmente una masa del neutrón que era 1,0067 veces la del protón; es decir, algo menos que la masa de un protón más la de un electrón (1,0078). Experimentos posteriores parecían confirmar que haría falta energía para dividir un neutrón en sus constituyentes y que la partícula era por tanto un sistema ligado protón-electrón. Sin embargo, nuevas y más precisas medidas mostraron que la masa del neutrón era un poco más grande que la del sistema protón-electrón. Esto se consideraba un hecho establecido en octubre de 1934, cuando se congregó un grupo de físicos en una conferencia sobre núcleos y rayos cósmicos en Londres. Quedó entonces claro que el neutrón era inestable y debía de caer espontáneamente en un protón y un electrón, una sugerencia propuesta por primera vez por Chadwick y Maurice Goldhaber en 1935. Tras esta fecha, se dejó de discutir sobre el neutrón compuesto y se excluyó finalmente a los electrones del núcleo. La desintegración del neutrón, sin embargo, tardó mucho en observarse. Esto requería fuentes intensas de neutrones producidas por reactores nucleares y se comunicó por primera vez en 1948, por A. H. Snell y sus colaboradores en Oak Ridge. Dos años después, J. M. Robson determinó en el reactor Chalk River en Canadá que la vida media del neutrón era aproximadamente de 13 minutos.

El neutrón era quizá el actor más dramático en lo que se denomina rutinariamente el *annus mirabilis* de la física nuclear y de partículas, 1932, aunque sería más apropiado hablar de los *anni mirabiles* 1931-1933. Pero no era el único actor, ni el primero. A finales de diciembre de 1931, Harold Urey, un químico de la Universidad de Columbia que había pasado un año con Bohr en Copenhague en 1923-1924, anunció el descubrimiento del deuterio. Junto con sus colaboradores, Ferdinand Brickwedde y George Murphy, Urey aisló el isótopo pesado del hidrógeno evaporando cuatro litros de hidrógeno líquido. Identificaron el isótopo espectrográficamente mediante el pequeño cambio en longitud de onda causado por el núcleo más pesado. La posterior preparación de agua pesada en 1933 fue llevada a cabo por otro químico estadounidense, Gilbert Lewis. Pronto quedó claro que los núcleos del isótopo pesado, artificialmente acelerados, eran ideales como proyectiles en reacciones nucleares. Durante un tiempo, se utilizó una confusa variedad de nombres para las partículas (entre ellos, diprotón, deutón y diplón), pero al final el nombre de Urey, «deuterón», ganó aceptación, junto con deuterio para el átomo correspondiente. (El nombre «protio» para el isótopo corriente de hidrógeno nunca llegó a ser popular.) Otro desarrollo muy importante a principios de los años treinta fue el descubrimiento de la radiactividad artificial, a principio de 1934 por los Joliot-Curie en conexión con la irradiación de aluminio con partículas alfa. Los dos científicos franceses detectaron la producción de los

todavía seguía vivo en el Cavendish y Chadwick se dio cuenta de que podría explicar la radiación del berilio. Por tanto, repitió y modificó los experimentos de París, y llegó rápidamente a la conclusión de que lo que se producía eran neutrones, no rayos gamma. Según Chadwick, el proceso era $^{4}He + {}^{9}Be \rightarrow {}^{12}C + n$, significando el símbolo n un neutrón con número másico 1. En su nota sobre «Possible Existence of a Neutron», Chadwick discutía la posibilidad de que los efectos observados se debieran a un «cuanto de alta energía» en vez de a un neutrón. «Hasta el presente», concluía, «toda la evidencia está a favor del neutrón, mientras que la hipótesis cuántica sólo se puede mantener si se sacrifica la conservación de energía y momento en alguna etapa». Chadwick también encontró electrones al bombardear boro con partículas alfa y, a partir de este proceso, infirió que la masa del neutrón debía estar cercana a 1,007 veces la masa del protón.

Ahora que el neutrón había sido descubierto, podría pensarse que no existía ninguna necesidad de tener electrones en el núcleo y que todo iba bien en el núcleo atómico, pero la situación era muy distinta en 1932. Chadwick interpretó su neutrón como el compuesto protón-electrón de Rutherford tan esperado, y supuso que «el protón y el electrón forman un pequeño dipolo, o también podemos considerar la imagen más atractiva de un protón inmerso en un electrón». Acerca de la posibilidad de que el neutrón pudiera ser elemental, Chadwick comentó que «[esta idea] cuenta con pocas recomendaciones en este momento, excepto la posibilidad de explicar la estadística de núcleos como el N^{14}» (Beyer 1949, pp. 15 y 19). Durante mucho tiempo Chadwick, y la mayoría de los otros físicos, dudaron en admitir que el neutrón era elemental. El primero en proponer que el neutrón era una primera partícula elemental con espín un medio fue el físico de Leningrado Dmitri Iwanenko. En el verano de 1932, Iwanenko enfatizó que la propuesta resolvería el enigma del nitrógeno 14. Sin embargo pasó un año hasta que la mayoría de los físicos, que llevaban tanto tiempo acostumbrados al paradigma de las dos partículas, aceptaran la naturaleza elemental del neutrón. Esta ambigua actitud quedaba claramente expuesta en la importante teoría de Heisenberg para la estructura nuclear de 1932-1933, en la cual introdujo fuerzas de intercambio entre protones y neutrones y trató al núcleo de una manera mecánico-cuántica. A pesar de considerar que los constituyentes del núcleo eran protones y neutrones, al principio Heisenberg hizo uso de los electrones nucleares y trató el neutrón como un compuesto protón-electrón. Las partículas elementales seguían siendo protones y electrones. La teoría de estructura nuclear de Heisenberg señaló el inicio de un nuevo capítulo de la teoría nuclear, o, mejor dicho, del principio del campo como tal y fue rápidamente continuado por importantes contribuciones de Eugene Wigner, Ettore Majorana, y otros.

Durante el congreso de Solvay de 1933 sobre «Estructura y propiedades de los núcleos atómicos», el neutrón tuvo un papel protagonista. Dirac sugirió que el núcleo estaba compuesto de tres tipos de partículas: protones, neutrones y electrones y la sugerencia no se consideró particularmente extraña en ese momento. Chadwick todavía vacilaba entre los dos puntos de vista, el del neutrón complejo y el del elemental. Fue-

recién descubiertos positrones, los cuales identificaron al principio como productos de la descomposición de los protones emitidos, es decir, $p \rightarrow n + e^+$. Sin embargo, pronto se dieron cuenta de que la actividad de los positrones proseguía después de que se retirara la fuente alfa y de que, de hecho, habían descubierto radiactividad beta positiva: $^4He + {}^{27}Al \rightarrow {}^{30}P + 1\,n$, seguida de $^{30}P \rightarrow {}^{30}Si + e^+$. La importancia del descubrimiento de radiactividad artificial fue inmediatamente reconocida y supuso el premio Nobel de Química para los Joliot-Curie en 1935. El nuevo fenómeno se utilizó amplia e inmediatamente en física nuclear, química, biología y medicina.

Los años 1932-1933 fueron realmente excitantes, no sólo en retrospectiva, sino también para los físicos que vivieron la época. En mayo de 1932, Bohr escribió a Rutherford, «el progreso en el campo de la constitución nuclear es en este momento tan rápido, que uno se pregunta qué traerá el correo nuevo [...] Uno ve abierta una amplia avenida nueva, y debería ser pronto capaz de predecir el comportamiento de cualquier núcleo en cualquier circunstancia dada» (Weiner 1972, p. 41). Dos años y medio después, Frank Spedding, un físico estadounidense, informó en una carta sobre la conferencia de Londres, «también hubo un simposio de física nuclear. El campo se mueve tan rápido que uno se marea al contemplarlo. Con lo que se habla de las propiedades experimentales del H, He, los nuevos elementos artificiales radiactivos, el neutrón y el positrón y las propiedades que se predicen para el neutrino y el protón de carga negativa, alguien que se ha formado con la vieja e ingenua imagen de protones y electrones en el núcleo se siente superado» (*ibid.*).

Estas fascinantes nuevas teorías y descubrimientos eran sólo una parte de los años milagrosos. Las nuevas tecnologías instrumentales no eran menos importantes: hasta 1930, aproximadamente, el único modo de hacer que ocurriera una reacción nuclear era utilizar los proyectiles que la naturaleza proporcionaba en forma de rayos alfa; la alternativa era hacer uso de la todavía menos controlable radiación cósmica, pero este método todavía estaba en su infancia. La primera desintegración nuclear provocada con éxito por medios puramente artificiales se obtuvo en la primavera de 1932 por John D. Cockcroft y Ernest Walton en el laboratorio Cavendish. Los dos físicos aplicaron un sistema multiplicador de tensión, proporcionado en parte por la Compañía Eléctrica Metropolitan-Vickers, donde Cockcroft había trabajado como aprendiz de ingeniero eléctrico antes de que se cambiara a la física y se incorporara al grupo de Rutherford en 1924. Con este aparato, obtuvieron energías de hasta 380 keV para los protones en 1929 y, tres años después, 700 keV. Cockcroft y Walton estudiaron el litio bombardeado con protones de alta energía y, utilizando métodos visuales de escintilaciones y fotografías de la cámara de niebla como detectores, concluyeron que «el isótopo de litio de masa 7 captura un protón y el núcleo resultante, de masa 8, se descompone en dos partículas α» (Beyer 1949, p. 30). Además, señalaron que el proceso ocurría para energías y ritmos en acuerdo cualitativo con los cálculos mecánico-cuánticos de Gamow. De hecho, estos cálculos se utilizaron directamente en el diseño del aparato de alta tensión de Cockcroft. Éste conocía la teoría de Gamow y se dio cuenta de que predecía que los protones a 300 keV serían proyectiles nucleares bastante efectivos para partículas como el boro y el litio.

Al mismo tiempo aproximadamente que Cockcroft y Walton desarrollaban su trabajo experimental pionero, otros tipos de aceleradores estaban progresando en Estados Unidos. En 1931 el ingeniero estadounidense Robert van de Graaf construyó un acelerador electrostático con una tensión máxima de 1,5 millones de voltios. El mismo año, Ernest Lawrence y su estudiante David Sloan en la Universidad de California, Berkeley, construyeron el primer acelerador lineal práctico, con el que obtuvieron iones de mercurio con 1,3 MeV de energía. Sin embargo, sería otra de las máquinas de Lawrence la que revolucionó la física nuclear e inauguró la era de la «gran ciencia». El primer ciclotrón experimental, utilizando fuertes campos magnéticos para hacer que las partículas nucleares trazaran una espiral con radio creciente según sus velocidades aumentaban, se construyó en 1931. La versión de 1932, con polos magnéticos en las caras de 28 centímetros de diámetro, produjo una corriente de 10-9 amperios con protones de 1,2 MeV. Lawrence y su colaborador, M. Stanley Livingston, predijeron confiados que se generarían haces de protones de 10 MeV «en un futuro no muy lejano», una predicción que sería pronto confirmada. Al principio la máquina no recibió un nombre propio, pero Lawrence y su grupo usaban la palabra «ciclotrón» en lo que describían como «una especie de jerga de laboratorio». En 1936, el nombre era de uso general. El ciclotrón probó ser muy útil en física nuclear en una gran variedad de áreas, desde investigación pura de reacciones nucleares hasta en aplicaciones industriales y médicas. Se trataba básicamente de tecnología estadounidense y, en los años treinta, sólo era dominada por Lawrence y los operadores de ciclotrón formados por él. En 1934 se empezaron a multiplicar las máquinas en Estados Unidos, al principio con un pequeño ciclotrón en la Universidad de Cornell construido por Livingston; cinco años más tarde, había diez máquinas más operando o en construcción. Fuera de los Estados Unidos, el primer ciclotrón se instaló en Riken (el Instituto para Investigación Física y Química) en Tokio en 1935 y se hizo operativo en la primavera de 1937. En Europa, los ciclotrones se introdujeron al mismo tiempo aproximadamente, pero de manera más dubitativa que en Estados Unidos. El dinero era una de las razones de la introducción relativamente lenta, pero el conservadurismo y la falta de familiaridad con la nueva tecnología también desempeñó un papel importante. A mediados de 1939 existían cinco ciclotrones operando en Europa, situados en Cambridge, Liverpool, París, Estocolmo y Copenhague.

La física experimental nuclear en general, y la de aceleradores en particular, ayudó a cambiar la distribución geográfica de la física mundial. Vale la pena mencionar que la fuerte comunidad física alemana no se uniera a la vanguardia del desarrollo sino que, por el contrario, quedara por detrás del desarrollo no sólo de Estados Unidos y Gran Bretaña, sino también del de Francia. Y también es notable que esto ocurriera incluso antes de que el régimen nazi cambiara las condiciones de la física en Alemania, y en una época en la que los físicos alemanes todavía estaban a la cabeza de otras áreas de la física.

A partir de 1910, aproximadamente, Francia no había conseguido mantener su posición anterior a la cabeza de la física. Comparado con lo que ocurrió en otras naciones, los físicos franceses tenían poco de qué presumir: por ejemplo, las revistas france-

sas no estaban entre las principales revistas de física. En 1934 las revista francesa más citada, *Comptes Rendus,* ocupaba el número 7 de todas las revistas de física (el número uno era *Zeitschrift für Physik*); *Journal de Physique* era el número 11 y *Annales de Physique* era sólo el número 34 de la lista. Otro indicativo de la baja reputación de la física francesa era que, mientras que el 27 por 100 de todas las referencias en las revistas de física norteamericanas se dedicaban a artículos en alemán, sólo el 3 por 100 se referían a artículos en francés. El surgimiento de la física nuclear, en cambio, fue uno de los factores que ayudaron a revitalizar la física francesa a finales de la década de los treinta y reinstaurar a París como una ciudad importante en la física mundial. El laboratorio de los Joliot-Curie se convirtió en uno de los principales centros de física nuclear, atrayendo a muchos físicos extranjeros.

A pesar del importante trabajo llevado a cabo en Gran Bretaña y Francia, fue en Estados Unidos donde se experimentó por primera vez su notable crecimiento. El porcentaje de artículos sobre física nuclear en *Physical Review* era de un 8 por 100 en 1932; en 1933 se incrementó al 18 por 100, en 1935 al 22 y en 1937 nada menos que al 32 por 100. La física nuclear estaba no sólo creciendo, sino también haciéndose cada vez más cara. Para estar en la vanguardia de la investigación nuclear, muchas veces era necesaria la financiación externa, como queda ilustrado por el hecho de que el 46 por 100 del número total de artículos financiados en *Physical Review* en 1935 eran de física nuclear. En 1939, un tercio de los artículos en *Physical Review* sobre física nuclear recibían financiación de instituciones externas.

CAPÍTULO 13

De dos partículas a muchas antipartículas

Las antipartículas

En el encuentro de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Bristol, en septiembre de 1930, Dirac dio un seminario en el que dijo, «siempre ha sido el sueño de los filósofos hacer que toda la materia esté construida a partir de un tipo fundamental de partícula, así que no es del todo satisfactorio tener dos en nuestra teoría, el electrón y el protón» (Kragh 1990, p. 97). Por aquel entonces, Dirac creía que había tenido éxito donde los filósofos habían fracasado y que había reducido toda la materia a manifestaciones del electrón solamente. (El lector reconocerá la vaga similitud con la teoría atómica de J. J. Thomson y, más generalmente, la cosmovisión electromagnética.) Dirac estaba profundamente fascinado por la imagen unitaria de la materia, y resulta irónico que sus consideraciones unitarias le llevaran a introducir, menos de un año después del seminario en Bristol, tres o cuatro nuevas partículas elementales además del electrón. Con la teoría de Dirac de 1931 y la hipótesis de Pauli sobre el neutrino, llegó la primera ruptura con el paradigma de las dos partículas.

Estaba claro para Dirac y varios de sus colegas que la teoría relativista de electrones de 1928 conducía a extrañas consecuencias. El problema, a veces denominado la «dificultad ±», tenía su origen en la ecuación de Dirac, que incluía formalmente soluciones con energía negativa. Al contrario de la situación en mecánica clásica, éstas no se podían rechazar como no físicas sino que tenían que considerarse seriamente; es decir, tenían que relacionarse de algún modo con objetos naturales. En noviembre de 1929, Dirac creía haber encontrado la solución al problema. «Existe una sencilla manera de evitar la dificultad de que los electrones tengan energía cinética negativa», escribió a Bohr y, continuó, «si el electrón arranca con una energía positiva (+), existirá una probabilidad finita de que pase súbitamente a un estado de energía negativa (–) y emita la energía sobrante en forma de radiación de alta energía [...] Si todos los estados de energía negativa están ocupados, pero pocos de energía positiva lo están, estos electrones

de energía positiva no podrán hacer transiciones hacia estados de energía negativa y, por tanto, deberán comportarse con bastante propiedad [...] Parece razonable suponer que no todos los estados de energía negativa están ocupados, sino que existen algunas vacantes o "huecos" [...] Es fácil ver que tal hueco se movería en un campo electromagnético como si tuviera carga positiva. Creo que estos huecos son los protones» (Kragh 1990, p. 91).

La teoría de Dirac sobre los protones-como-electrones, publicada en 1930, suponía un mundo de estados de energía negativa ocupado por un número infinito de electrones gobernados por el principio de exclusión de Pauli. Sólo los pocos estados sin ocupar, los «huecos», aparecerían como entidades físicas observables. Pero ¿por qué aparecerían como protones, dos mil veces más pesados que los electrones? Existían dos razones para la elección de Dirac: por un lado, si los protones y los electrones eran las únicas partículas elementales (como creían entonces casi todos los físicos) parecía que no había otra posibilidad; por otro lado, la hipótesis habría supuesto el cumplimiento del milenario, y muy atractivo para Dirac, «sueño de los filósofos».

Atractiva o no, la hipótesis se recibió universalmente con escepticismo, e inmediatamente se encontró con serios problemas. Por ejemplo, si el protón fuera la antipartícula del electrón (un nombre que todavía no se había introducido), se suponía que se aniquilaría según $p^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, y los cálculos indicaban que la vida media de la materia sería, en tal caso, absurdamente corta, de unos 10^{-9} segundos. Este argumento por sí solo no fue suficiente para convencer a Dirac de que su teoría era errónea, pero en la primavera de 1931 se dio cuenta (como otros antes) que el hueco tenía que tener la misma masa que el electrón. En la nueva versión, como apareció en un notable artículo en los *Proceedings of the Royal Society*, el antielectrón se introducía por primera vez como «un nuevo tipo de partícula, desconocida para la física experimental, con la misma masa que un electrón y carga opuesta» (Kragh 1990, p. 103). Además, dado que el protón era ahora un tipo diferente de partícula, tendría probablemente, según Dirac, su propia antipartícula. Unos pocos años después, en su discurso Nobel de 1933, Dirac dio un paso más, especulando sobre materia compuesta enteramente de antipartículas: «Debemos considerar básicamente un accidente que la Tierra (y, es de suponer, todo el sistema solar) contenga una preponderancia de electrones negativos y protones positivos. Es bastante probable que para algunas estrellas sea al revés: que estas estrellas estén compuestas principalmente de positrones y protones negativos. De hecho, puede que la mitad de las estrellas sea de un tipo, y la otra mitad del otro. Los dos tipos de estrella mostrarían exactamente los mismos espectros, y no habría manera de distinguirlas mediante los métodos astronómicos actuales». Sin embargo, en 1931 el antielectrón era una partícula puramente hipotética y la mayoría de los físicos declinaban tomar la teoría de Dirac en serio. Fue sólo más adelante cuando se reconoció como «quizá el salto más grande de todos los grandes saltos de la física en nuestro siglo», como Heisenberg la denominó con generosidad en 1973.

El artículo de Dirac de 1931 no trataba principalmente con antielectrones, sino que era un ambicioso, y fallido, intento de explicar la razón de la existencia de una carga

eléctrica unidad. Durante el proceso de su trabajo, Dirac se vio llevado a introducir un factor de fase no integrable en la función de onda; mostró que esto era equivalente a introducir un campo magnético con una carga magnética como fuente; es decir, un monopolo magnético como un análogo magnético del electrón. Este monopolo de Dirac era una partícula hipotética, justificada sólo en el sentido que no estaba prohibida por la mecánica cuántica. Dirac se dio cuenta de que esto no aseguraba la existencia real de monopolos en la naturaleza, pero dado que no había razón teórica para prohibir la existencia de monopolos, «uno se sorprendería si la Naturaleza no la hubiera utilizado [la posibilidad]». En la historia de las ideas, este tipo de argumento (que las entidades que pueden existir deben existir) se remonta a Leibniz, y se conoce como el principio de plenitud. Al contrario que el positrón, el monopolo magnético no despertó interés entre los físicos, la mayoría de los cuales ignoraron la partícula propuesta. Existían, sin embargo, algunas especulaciones de que el neutrón podría consistir en dos polos magnéticos de carga opuesta, o de que el monopolo podría desempeñar si no un papel en el núcleo atómico. Fue sólo en los años setenta cuando la teoría de monopolos, además de búsquedas experimentales de la partícula, se convirtió en un área principal de investigación. Desde entonces, ha habido varios anuncios de detecciones de monopolos magnéticos, pero ninguno se ha confirmado. Puede que los monopolos existan, o que hayan existido alguna vez, pero el monopolo magnético de finales de los noventa tiene el mismo estatus que el que tenía en 1931: es hipotético (véase también el capítulo 21).

El estatus del antielectrón, por otra parte, cambió durante el bienio 1932-1933. En el California Institute of Technology, Carl Anderson, un antiguo estudiante de Millikan, se fijó en algunas trazas de fotografías de cámara de niebla de la radiación cósmica, que al principio atribuyó a protones. En un artículo posterior en marzo de 1933, sugirió que había descubierto un electrón de carga positiva, o «positrón», como él lo denominó. También sugirió «negatrón» para el electrón ordinario, pero el nombre, aunque se usó alguna vez, no gozó de éxito. La detección de los positrones por parte de Anderson podría parecer un bonito caso de descubrimiento inspirado por la teoría, pero el descubrimiento en realidad no debe nada en absoluto a la teoría de Dirac. En lugar de interpretar el electrón positivo como el resultado de una producción de un par, a la Dirac, Anderson creía que se había emitido desde un núcleo atómico dividido por un rayo fotón cósmico incidente. Su explicación tentativa no se refería ni a Dirac ni a la mecánica cuántica; tenía un aire anticuado y se basaba en un concepto visible del núcleo que estaba de acuerdo con las ideas de Millikan, pero que no tenía casi nada que ver con los sofisticados modelos cuánticos que Heisenberg y otros estaban estableciendo por aquel entonces. Anderson escribió, «Si retenemos la imagen de que un núcleo consiste en protones y neutrones (y partículas α) y que un neutrón representa una combinación cercana de un protón y un electrón, entonces, basándose en la teoría electromagnética sobre el origen de la masa, la suposición más simple parece ser que un encuentro entre el rayo primario incidente y un protón puede tener lugar de manera que el diámetro del protón se expanda hasta el mismo valor que posee el negatrón» (Beyer 1949, p. 4).

No fue sino hasta después de que Blackett y el físico italiano Guiseppe Occhialini informaran sobre nuevos experimentos con rayos cósmicos, y se refirieran explícitamente a la teoría de Dirac, cuando quedó claro que Anderson de hecho había descubierto la partícula de Dirac. En un año, el positrón se había aceptado en general y había sido recibida como una importante partícula, tanto en la teoría como en la experimentación. Sin embargo, la positiva recepción del positrón no implicó una recepción igualmente positiva de la teoría de huecos de Dirac, que continuó siendo criticada. Todavía en 1934, Millikan y Anderson se aferraban a la imagen de que los positrones de los rayos cósmicos existían ya, o se formaban en los núcleos atómicos, y por lo tanto no debían identificarse con antielectrones. Algunos teóricos, incluyendo a Pauli, sugirieron que los positrones podían satisfacer la estadística de Bose-Einstein y que el neutrino, que se pensaba que podría quizá ser una partícula nuclear, consistía en un par positrón-electrón. Mientras que el positrón (alias, antielectrón) se aceptó a mediados de los treinta, otras hipótesis sobre antipartículas tuvieron una existencia más silenciosa. El protón negativo se discutió a veces, pero no necesariamente como la antipartícula del protón. Por ejemplo, Gamow sugirió en varios artículos entre 1934 y 1937 que el núcleo atómico incluía protones negativos distintos de los antiprotones de Dirac. En cuanto al antineutrón, se introdujo por primera vez en 1935 por el físico italiano (más tarde brasileño) Gleb Wataghin.

Sorpresas de la radiación cósmica

En la época en la que Dirac propuso su teoría de huecos, la radiación cósmica todavía se consideraba un área misteriosa de la naturaleza, y su composición era objeto de controversia. Algunas de las partículas de los rayos cósmicos poseían energías muy elevadas (mucho mayores que las que podían proporcionar los nuevos aceleradores) y por esta razón, la radiación era interesante para los físicos nucleares y de partículas. La física de rayos cósmicos era altamente relevante para las teorías fundamentales de la física y a la vez, con sus vuelos en globo y alpinismo, todavía tenía algo del encanto de las exploraciones naturales. Como escribió el físico estadounidense Karl Darrow en 1932, el nuevo campo era «único en la física moderna por lo minúsculo de los fenómenos, lo delicado de las observaciones, las arriesgadas aventuras de los observadores, la sutileza del análisis y la grandeza de las consecuencias» (Cassidy 1981, p. 2). El descubrimiento del positrón fue crucial a la hora de hacer de la investigación de los rayos cósmicos un campo central de la física. Esto puede observarse, por ejemplo, en el número de artículos (incluyendo cartas) publicadas sobre el asunto en *Physical Review*. En 1928 aparecieron dos artículos sobre rayos cósmicos, y en 1929 sólo uno; en 1930 el número subió a 4, y en 1931 a 9. El año siguiente el número saltó a 30 artículos, y en 1933 había nada menos que 43 artículos sobre rayos cósmicos o el positrón.

La radiación cósmica tenía fama de laboratorio económico porque la naturaleza proporcionaba gratuitamente partículas con energías inauditas en laboratorios auténticos. La desventaja, por supuesto, era que los proyectiles eran totalmente incontrolables y, en

muchos casos, incluso desconocidos. La comparación económica con los experimentos de aceleradores se justificaba en lo tocante a costos y organización. Había pocas diferencias entre la investigación de rayos cósmicos de los años treinta y los experimentos clásicos de bajo coste del Cavendish en los años veinte. Rutherford no hubiera objetado la investigación de rayos cósmicos. En 1933 Jabez Street, un prominente físico de rayos cósmicos estadounidense y más tarde codescubridor del muón, solicitó a Theodore Lyman, su director en Harvard, una beca de 800 dólares para una investigación de un año. La solicitud consistía en una página escrita a mano, sosteniendo que «el carácter discordante de los resultados obtenidos por los profesores Compton y Millikan deja claro que la acumulación de datos sobre la naturaleza de los rayos cósmicos deja mucho que desear» (Galison 1987, p. 78). Street recibió sus 800 dólares y los empleó con sabiduría.

Para entender lo que sucedía en los detectores de rayos cósmicos, estuvieran a bordo de un globo o situados en altos picos montañosos, los físicos necesitaban conocer la naturaleza de los rayos cósmicos mismos. Millikan, y con él sus estudiantes, todavía abogaban por la teoría original, según la cual los rayos cósmicos primarios eran fotones de alta energía. Esto implicaba que no debería existir ningún efecto geomagnético de latitud, es decir, ninguna variación este-oeste como resultado de la deflexión de las partículas en el campo magnético de la tierra, y de hecho Millikan y sus colaboradores no encontraron evidencia en absoluto de tal efecto. Por otro lado, los físicos estadounidenses de la costa este, y Arthur Compton en particular, sostenían que existía indiscutible evidencia de un efecto de latitud y que los rayos cósmicos primarios debían por tanto consistir en partículas cargadas. El desacuerdo se convirtió en una gran controversia, que fue bien cubierta en los periódicos estadounidenses. El resultado de la controversia fue, básicamente, que Millikan perdió y Compton ganó. Ya en 1929, Walther Bothe y Werner Kohlhörster en Berlín afirmaron haber demostrado que los rayos cósmicos incluían partículas cargadas penetrantes en vez de los «rayos ultra gamma», como se creía hasta entonces. Su conclusión quedó confirmada por el joven físico italiano Bruno Rossi de la Universidad de Florencia. Rossi desarrolló una importante nueva técnica conectando contadores Geiger-Müller en un «circuito coincidente» de tal modo que sólo las partículas que atravesaran todos los contadores quedaran registradas. Sobre 1933, se acumuló evidencia experimental en contra de la teoría fotónica de Millikan, esencialmente medidas a distintas latitudes geográficas. La mayoría de las partículas penetrantes de la radiación cósmica primaria resultaron estar cargadas y, por alguna razón desconocida, positivamente. Durante algún tiempo Millikan, Anderson y otros californianos se resistieron a esta conclusión, pero a partir de 1935, aproximadamente, la controversia llegó a su fin. Experimentos británicos que utilizaron circuitos coincidentes construidos con cámaras de niebla controladas por contadores confirmaron las conclusiones de Bothe, Kohlhörster y Rossi. En 1935 Street mostró que la gran mayoría de los sucesos en las placas de plomo eran partículas cargadas individuales, por tanto altamente penetrantes, y no una lluvia o cascada de partículas originadas en fotones. Esto concluyó la controversia, más o menos, pero también planteó una pregunta pertinente: ¿qué eran estas partículas?

Se pensaba al principio que las partículas penetrantes de los rayos cósmicos eran electrones, pero la manera en que perdían su energía indicaba que podían no ser electrones ordinarios. Actuaban extrañamente, y Anderson y su grupo en Caltech se refería a ellos informalmente como electrones «verdes» para distinguirlos de los electrones ordinarios, absorbibles o «rojos». En 1936 la naturaleza de estos electrones verdes se convirtió en un objeto de gran discusión, entre otras cosas porque una posible solución al problema era teórica: que la electrodinámica actual podría ser incapaz de explicar el fenómeno. Parecía que existían dos alternativas, o bien la teoría cuántica se infringía a altas energías o bien una nueva partícula, intermedia en masa entre el protón y el electrón, entraba en juego. Casi todos los físicos escogieron la primera alternativa, pero la solución del enigma resultó estar en la segunda.

¿Podían ser protones estas partículas? No según Anderson y Seth Neddermeyer, que concluyeron en la conferencia de Londres en 1934 que «la mayoría de las partículas de rayos cósmicos de alta energía a nivel del mar tienen masa electrónica» (Galison 1983, p. 287). Si estas partículas de masa electrónica no eran electrones, ¿qué eran? El 12 de diciembre de 1936, Anderson recibió el premio Nobel por su descubrimiento del positrón. Podría haber sido una oportunidad para especular sobre los misteriosos electrones verdes, pero Anderson resistió la tentación. En su discurso en Estocolmo, mencionó los nuevos datos sobre rayos cósmicos y observó que «estas partículas altamente penetrantes, aunque no sean electrones positivos y negativos libres, proporcionarán interesante material para estudios futuros». Así fue: en la primavera de 1937, Anderson y Neddermeyer llegaron a la conclusión de que la hipótesis más razonable era que «existían partículas de carga unidad, pero con una masa (que puede no tener un valor único) mayor que la de un electrón normal libre y mucho menor que la de un protón» (*ibid.*, p. 298). Poco después, al otro lado del continente americano, Street y su grupo llegaron a una conclusión similar, aunque mediante argumentos muy distintos, y también lo hizo un grupo japonés dirigido por Yoshio Nishina. El descubrimiento de lo que se conoce hoy en día como muón fue por tanto triple, aunque no existe discusión acerca de la prioridad: les correspondió a los californianos. Una partícula con masa intermedia entre el electrón y el protón, un mesón, había sido descubierta. ¿O no? Exactamente cuándo fue descubierto el electrón pesado, mesón μ o muón es una pregunta que apenas merece contemplarse, pero si la merece, es una pregunta compleja. En cualquier caso, es una pregunta relacionada con otros desarrollos en física de rayos cósmicos y de partículas que tuvieron lugar aproximadamente al mismo tiempo, y por tanto no puede contestarse de manera aislada de estos desarrollos.

Después de que se reconociera que la partícula de Anderson-Neddermeyer-Street era real, la siguiente cuestión era obviamente determinar su masa y otras características, como su espín y sus modos de desintegración. Una pregunta menos importante, pero que también tenía que decidirse, era la concerniente al nombre de la partícula. Entre los nombres sugeridos estaban mesón, mesotrón, baritrón, electrón pesado y yukón; los dos primeros derivaban de la masa de la partícula, el último de la reciente teoría de «cuantos pesados» de Yukawa. Durante un tiempo, el «mesotrón» sugerido por

Millikan, Anderson, Neddermeyer era de uso general, pero en los años cuarenta el «mesón», abreviado, sugerido por Homi Bhabha, acabó siendo el nombre más popular y fue oficialmente aprobado por la Comisión de rayos cósmicos de la Unión Internacional de la Física en 1947. En 1937 Street y Edward C. Stevenson estimaron, a partir de la ionización específica y longitud de la traza en la cámara de niebla, un valor para la masa del mesotrón de unas 130 veces la masa del electrón, no muy distinto de la estimación de 200 veces en la teoría de Yukawa para las fuerzas nucleares. La identificación de la partícula de Yukawa y del mesotrón de 1937 fue sugerida por primera vez por Oppenheimer y Robert Serber el mismo año, siendo un desastre menor, como veremos más adelante. El hecho de que la predicción de Yukawa fuera publicada antes del descubrimiento del mesotrón, y la creencia de los físicos de que la predicción se refería al mesotrón, no significa que el descubrimiento experimental estuviera relacionado causalmente con la teoría de mesones. Como en el caso del positrón, no existía conexión entre teoría y experimento. Anderson y Neddermeyer no supieron de la

TABLA 13.1
Algunos descubrimientos de partículas, 1897-1956

Nombre actual	*Nombre(s) antiguo(s)*	*Predicción*	*Descubrimiento*
Electrón	corpúsculo, negatrón	1894; J. Larmor	1897; J. J. Thomson
Protón	partícula H	—	Alrededor de 1913 (ningún descubridor)
Neutrino	neutrón	1929; W. Pauli	1956; F. Reines, C. Cowan
Positrón	electrón positivo	1931; P. Dirac	1932; C, Anderson
Neutrón	—	1920; E. Rutherford	1932; J. Chadwick
Antiprotón	protón negativo	1931; P. Dirac	1955; O. Chamberlain, E. Segré, C. Wiegand, T. Ypsilantis
Antineutrón	—	1935; G. Wataghin	1956; B. Cork, G. Lambertson, O. Piccioni, W. Wenzel
Muón	mesotrón, mesón μ	—	1937; C. Anderson, S. Neddermeyer
Pión cargado	mesón π	1935; H. Yukawa	1947, C. Powell, G. Occhialini, C. Lattes
Pión neutro	mesón π	1938; N. Kemmer	1950; R. Bjorklund, W. Crandall, B. Moyer, H. York
Barión Λ^o	partícula V	—	1947; C. Butler, G. Rochester
Barión $K\pi_3$	mesón π	—	1949; C. Powell *et al.*

predicción de Yukawa hasta el verano de 1937. Como Neddermeyer recordó más tarde: «El muón, como el positrón, fue un descubrimiento puramente experimental, en el sentido de que se realizó de manera totalmente independiente de cualquier consideración teórica sobre qué partículas deberían existir o no» (Brown 1981, p. 132).

Habría que esperar hasta el final de la Segunda Guerra Mundial para que se obtuvieran valores más precisos para la masa del mesotrón. En 1950 el valor de la masa se había determinado en 215 ± 6 masas electrónicas, claramente distinto de lo que se sabía por entonces acerca de la masa del mesón de Yukawa. En lo concerniente a la desintegración, la identificación del mesotrón con la partícula de Yukawa indicaba los esquemas de desintegración $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu$ ó $\mu^- \rightarrow e^- + \overline{\nu}$ en analogía con la desintegración beta. Se sabía muy poco de los muones, como se acabó denominando a estas partículas en los años treinta. Fue tan sólo en 1941 cuando Franco Rasetti de la Universidad de Roma (aunque trabajando por aquel entonces en Canadá) determinó un tiempo de vida medio de $(1{,}5 \pm 0{,}3) \times 10^{-6}$ segundos, un valor no muy distinto del que se acepta hoy en día. No existían indicativos firmes del espín del mesotrón en aquella época. Generalizando, aunque el descubrimiento del mesotrón fue útil a la hora de entender el contenido en partículas de la radiación cósmica, y después para el rango de validez de la electrodinámica cuántica, no aclaró realmente la situación de la física de partículas elemental (véase tabla 13.1). De hecho, aunque este hecho era felizmente desconocido en la época, hizo que la situación fuera todavía más complicada.

Crisis de la teoría cuántica

Dirac fue el primero, en 1927, en desarrollar una teoría cuántica del campo electromagnético, seguido por Jordan, de manera independiente. Jordan creía «muy probable» que la teoría se desarrollara pronto en «la formulación natural de la teoría cuántica electrónica, mediante la descripción de luz y materia como ondas interactuantes en el espacio tridimensional» (Rueger 1992, p. 312). Sin embargo, el desarrollo resultó mucho más frustrante de que lo que se esperaba en 1927. Dos años después, Pauli y Heisenberg propusieron una ambiciosa teoría de electrodinámica cuántica (QED) que era relativistamente invariante e incluía la cuantización de la radiación además de las ondas de materia. La teoría Heisenberg-Pauli fue una obra maestra de física matemática y el fundamento de futuras teorías de QED, pero también era complicada e indigerible para la mayoría de los físicos. A pesar de sus prometedoras características, estaba plagada de paradojas y magnitudes divergentes. En particular, la energía propia del electrón (la energía de un electrón en su propio campo electromagnético) resultaba infinita, lo cual era, por supuesto, un resultado inaceptable. Sin embargo, muchas aplicaciones del formalismo de Heisenberg-Pauli eran independientes de las deficiencias teóricas.

Después del desarrollo rápido y lleno de éxito de la mecánica cuántica no relativista de 1925 a 1927 sucedió un periodo de serias dudas sobre los fundamentos de la mecánica cuántica, al intentar establecer una teoría invariante relativista de las interac-

ciones electromagnéticas. Muchos físicos creían que una nueva revolución cuántica, basada en algún concepto radicalmente nuevo, estaba próxima. Los problemas eran de una naturaleza en parte lógica y conceptual, y en parte debidos a fallos en la teoría existente a la hora de dar cuenta de nuevos hallazgos empíricos. Dentro del primer grupo de problemas, el caso arquetípico era la energía propia del electrón puntual, que resultaba ser infinita, y éste era sólo uno de los serios problemas que acechaban a la electrodinámica cuántica basada en la teoría de Heisenberg y Pauli de 1929. Mientras que la energía propia infinita tenía su homólogo en la teoría clásica, aparecieron nuevas divergencias de naturaleza no clásica en la teoría cuántica de campos relativista. Por ejemplo, J. Robert Oppenheimer probó en 1930 que, además de la energía propia electrostática clásica, un nuevo efecto cuántico contribuiría a la energía propia con un término divergente cuadráticamente. Como Oppenheimer señaló, las divergencias deberían causar un desplazamiento infinito de las líneas espectrales. Cuando se incorporó el positrón a la teoría cuántica de campos, los infinitos siguieron ahí: en la teoría del positrón, la contribución a la densidad de carga eléctrica debida a la polarización del vacío se demostró que era divergente. Otro tipo más de divergencia, la «catástrofe infrarroja» surgió a finales de los treinta en conexión con los intentos de explicar la emisión de electrones blandos durante la dispersión de partículas cargadas. La consistencia lógica de la teoría cuántica relativista también se cuestionaba en conexión con la legitimidad del campo electromagnético cuántico. En 1931, Landau y Peierls argumentaron que las medidas de campo no se podían realizar sin ambigüedades y que por tanto la electrodinámica cuántica del momento era inconsistente. La crítica de Landau y Peierls fue preocupante hasta 1933, cuando Bohr y Léon Rosenfeld mostraron que las consecuencias de la electrodinámica cuántica eran consistentes con las mejores medidas posibles de magnitudes del campo electromagnético. El trabajo de Bohr y Rosenfeld se interpretó generalmente como si los fallos de la QED pudieran evitarse si sólo se formulaban preguntas acerca de magnitudes de campo promediadas, definidas en regiones del espacio-tiempo no puntuales.

La situación teórica y conceptual en la QED fue un motivo de gran preocupación para los físicos. En 1930 Bohr escribió a Dirac: «[...] creo firmemente que la solución de los problemas actuales no se alcanzará sin una revisión de nuestras ideas físicas generales todavía más profunda de la que se contempla en la mecánica cuántica actual» (Cassidy 1981, p. 9). Tres años después, los problemas se hicieron aún más graves. Robert Oppenheimer los resumía así a su hermano Frank: «Como sin duda sabes, la física teórica (con los fantasmas de los neutrinos, la convicción de Copenhague, contra toda evidencia, de que los rayos cósmicos son protones, la teoría de campos de Bohr absolutamente incuantizable, las dificultades con las divergencias para el positrón, y la absoluta imposibilidad de llevar a cabo ni un sólo cálculo riguroso) está metida en un buen follón» (Kragh 1990, p. 165). En 1936 Dirac llegó a la conclusión de que la QED tenía que abandonarse porque era una teoría fea y complicada y en realidad no explicaba nada. A Einstein, que encontraba la QED «horrible», le agradó la conclusión de Dirac.

Con el segundo grupo de problemas, las anomalías experimentales, los desafíos más serios eran los derivados del entendimiento del núcleo atómico y la parte de alta energía de la radiación cósmica. La teoría del frenado de partículas rápidas cargadas por materia no estaba de acuerdo con los experimentos, como Walter Heitler, un experto en cálculos de teoría cuántica de campos, concluyó en 1933. Cuando se unió a Bethe para desarrollar una teoría del frenado más rigurosa, los desacuerdos permanecieron. «La pérdida de energía por radiación teórica para energía inicial elevada es claramente demasiado alta para que sea reconciliable en algún modo con los experimentos [con rayos cósmicos] de Anderson», escribieron en 1934 Bethe y Heitler. «Es muy interesante que la pérdida de energía de los electrones rápidos [...] proporciona el primer ejemplo en el que la mecánica cuántica aparentemente se infringe para un fenómeno fuera del núcleo» (Galison 1983, p. 285). Los datos que Anderson y Neddermeyer presentaron en la conferencia de Londres en octubre de 1934 mostraban buen acuerdo con la teoría para energías bajas, pero un desacuerdo total para energías superiores a unas 150 veces la energía en reposo del electrón ($mc^2 = 0{,}51$ MeV). Para explicar la discrepancia entre teoría y experimentos, se sugirió que las partículas penetrantes eran protones y no electrones; y cuando esta teoría resultó insostenible, se concluyó que la QED había fracasado a altas energías. De acuerdo con el informe de Bethe sobre la conferencia de Londres, «los experimentos de Anderson y Neddermeyer sobre el paso de electrones de rayos cósmicos a través de plomo [...] [muestra que] la teoría cuántica al parecer deja de funcionar para energías de unos 10^8 voltios» (*ibid.*, p. 288). Bethe, Heitler, Oppenheimer y otros teóricos cuánticos se enfrentaban a una elección entre introducir una nueva partícula o aceptar la ruptura de la QED. Entre las dos posibilidades, escogieron la segunda. Con el descubrimiento del mesotrón (muón) en 1937, la situación mejoró considerablemente y muchos físicos concluyeron que no había necesidad de una revolución cuántica después de todo. Pero el sentimiento de crisis prosiguió, ya que la QED estaba todavía plagada de infinitos, y las nuevas teorías de campo del mesón que surgieron a finales de los años treinta tenían sus propios problemas de divergencias.

Las respuestas a lo que se percibía como una crisis continuada variaban. Muchos físicos importantes, incluyendo a Bohr, Dirac, Heisenberg, Pauli y Landau, creían en un enfoque revolucionario; es decir, que los problemas no se podían resolver dentro de la teoría existente sino que se deberían explotar para construir una teoría futura que podría diferir de la teoría cuántica existente tanto como ésta difería de la teoría clásica. Otros físicos, de disposición más pragmática (incluyendo a Bethe, Heitler, Fermi y Oppenheimer) mantenían que los problemas se podían evitar mediante mejoras técnicas, o que alguna reformulación apropiada de la teoría existente podría llevar al menos a respuestas sensatas a todos los problemas que aparecieran empíricamente. Aunque estas dos actitudes se pueden identificar como tendencias históricas, la diferencia entre «revolucionarios» y «conservadores» no era absoluta ni permanente. Por ejemplo, aunque Heisenberg y Dirac favorecían en general el enfoque revolucionario (que la teoría existente debería reemplazarse por otra completamente nueva) esto no les impidió ex-

plorar maneras de solucionar los problemas que estuvieran basados en modificaciones de la teoría existente.

Por conveniencia, se pueden dividir en cuatro clases las actitudes de los físicos de los años treinta con respecto a los problemas de la teoría cuántica.

1. Algunos de los físicos de conciencia revolucionaria incluso dieron la bienvenida a la serie de crisis, que consideraban genuinas manifestaciones de las limitaciones de la teoría existente y por tanto una pista de la futura teoría que habían soñado. Heisenberg creía que los términos infinitos no debían descartarse y que también ocurrirían en la teoría correcta del futuro, en una versión interpretada apropiadamente.
2. Otros físicos se concentraron en evitar las divergencias sin cambiar el marco de la teoría existente. Una manera de conseguirlo era cortando las contribuciones de alta frecuencia. Los procedimientos de corte *(cutoff)* se utilizaban frecuentemente y demostraron su utilidad en cálculos prácticos, pero dado que no tenían justificación teórica y que destruían la invariancia relativista, se consideraban generalmente pseudosoluciones pragmáticas. Otra manera de extraer información fiable de una teoría presumiblemente poco fiable era omitir o sustraer términos indeseados mediante técnicas de cálculo adecuadas. Este enfoque, introducido por Dirac y Kramers, contenía el germen de los procedimientos de renormalización que se desarrollaron después de 1945 y a los cuales volveremos en el capítulo 22.
3. Un enfoque relacionado era intentar eliminar las divergencias mediante, o bien cambios directos en la teoría cuántica, o bien cambiando la fundamentación clásica. El primer enfoque fue propuesto por Gregor Wentzel en su método denominado de λ límite (1933) y por Dirac en su introducción de probabilidades negativas y una métrica indefinida para el espacio de Hilbert (1941). El enfoque de reformar la teoría clásica fue adoptado, de distinta manera, por Born y Leopold Infeld en su teoría de campos no lineal de 1934 y por Dirac en su teoría de electrones de 1938.
4. Un último enfoque era abandonar la electrodinámica cuántica y reemplazarla, al menos temporalmente, con una teoría más modesta, o un grupo de reglas, basadas en argumentos de correspondencia. Esta alternativa fue seguida por un tiempo por Christian Møller, Oppenheimer y Bethe, pero quedó claro que era menos fundamental que la electrodinámica cuántica.

Heisenberg era uno de los contribuyentes más activos a la discusión fundacional de la QED, tanto en sus contextos puramente teóricos como en sus aplicaciones a los fenómenos de rayos cósmicos. Su manera favorita de resolver los problemas de divergencia era introducir una longitud mínima, como hizo en 1938, cuando argumentaba que la longitud mínima o fundamental debería derivarse de la nueva teoría del mesón de Yukawa. Heisenberg esperaba construir sobre esta base una teoría cuántica nueva.

invariante relativistamente, que contuviera a la antigua como un caso límite y difiriera de ella sólo cuando la longitud fundamental no se pudiera considerar una cantidad infinitesimal. Sin embargo, su teoría recibió críticas de la mayoría de los demás físicos, incluyendo a Pauli, quien al principio había cooperado con Heisenberg en su programa de investigación.

El cuanto pesado de Yukawa

«En el momento actual de la teoría cuántica se conoce poco sobre la naturaleza de la interacción entre las partículas elementales». Así empezaba el artículo de Hideki Yukawa, un físico japonés de veintiocho años de la Universidad Imperial de Osaka, en el primer número del volumen de 1935 de las *Actas de la Sociedad Físico-Matemática de Japón*, una revista no muy conocida fuera de Japón. El artículo se basaba en un discurso de diez minutos impartido en el encuentro de la Sociedad Físico-Matemática en Tokio el 17 de noviembre de 1934. Yukawa se ocupaba de las fuerzas nucleares y estaba inspirado, por un lado, por la teoría nuclear de Heisenberg de 1932 y, por otro, por la teoría de la radiactividad beta de Fermi de 1934. Basando su razonamiento en ideas de estas dos fuentes, intentó desarrollar una imagen unificada de lo que más tarde se denominaría las interacciones débiles y fuertes. Durante su intento, se vio llevado a postular «un nuevo tipo de cuanto» que mediaba las fuerzas de intercambio en el núcleo atómico en analogía con el fotón en los campos electromagnéticos. Yukawa sugirió que el nuevo potencial nuclear se desintegraría muy rápidamente con la distancia y que el rango del potencial sería aproximadamente $\lambda = 2 \times 10^{-15}$ m, el tamaño característico de los núcleos atómicos. Sugirió además que el parámetro de rango estaría relacionado con la masa del «cuanto *U*» cargado según $\lambda = 2\pi mc/h$, y así predijo un valor para su masa de unas 200 masas electrónicas.

Pero ¿existían los cuantos pesados o eran simplemente aberraciones matemáticas? Yukawa mencionaba cautamente que «dado que un cuanto así, de masa elevada y carga positiva o negativa, nunca se ha encontrado experimentalmente, parece que la teoría descrita va por mal camino» (Beyer 1949, p. 144). Sin embargo, existen pocas dudas de que Yukawa creía que sus cuantos existían y que no compartía los temores de sus colegas occidentales a la hora de introducir nuevas partículas. Aunque los cuantos pesados no aparecían en experimentos ordinarios, argumentó que serían observables en interacciones a altas energías, como en las que ocurrían en la radiación cósmica.

La predicción de Yukawa de una nueva partícula elemental entre el electrón y el protón fue acogida silenciosamente. Durante más de dos años pasó desapercibida, no sólo en Europa y Estados Unidos, sino también en Japón. El mismo Yukawa dejó el asunto durante más de un año. Fue sólo cuando las medidas anómalas de Anderson y Neddermeyer empezaron a atraer atención cuando Yukawa, el 18 de enero de 1937, envió una nota a una revista occidental sobre su teoría, sugiriendo que «no es totalmente imposible que las trazas anómalas descubiertas por Anderson y Neddermeyer, que es probable que pertenezcan a rayos desconocidos con e/m mayor que el protón, sean

en realidad debidas a estos cuantos [*U*]» (Brown y Rechenberg 1996, p. 123). El editor de *Nature* declinó la publicación porque juzgó que la sugerencia era especulativa. (Cuatro años antes, la misma revista había rechazado también el artículo de Fermi sobre desintegración beta.) Sin embargo, con el anuncio en mayo de 1937 de que el mesotrón había sido descubierto en la radiación cósmica, la respuesta a la teoría de Yukawa cambió drásticamente. La primera referencia a ella en una revista occidental provino de Oppenheimer y Serber en junio de 1937, cuando juzgaron que la teoría de Yukawa era artificial e incorrecta. Sin embargo, una respuesta negativa puede ser a veces mejor que ninguna, y la evaluación crítica de Oppenheimer y Serber sirvió sin duda de anuncio efectivo para la teoría japonesa. En otoño de 1937, los físicos en Europa y Estados Unidos estaban ocupados estudiando el artículo del desconocido físico japonés. La razón del súbito cambio de actitud de indiferencia a entusiasmo era claramente que los físicos encontraron en la predicción de Yukawa la misma partícula que se había acabado de descubrir experimentalmente por Anderson y Neddermeyer. En otras palabras, el mesotrón era el cuanto *U*. La identificación fue asumida en general, pero pronto resultó ser problemática. Durante los años siguientes a 1937, la teoría mesónica de las fuerzas nucleares atrajo mucho interés y fue desarrollada por un gran número de físicos, sobre todo en Japón y Europa. Entre los contribuyentes japoneses más importantes estaban Yukawa, Sin-Itiro Tomonaga, Shoichi Sakat y Mituo Taketani; los europeos incluían a Heitler, Nicholas Kemmer, Herbert Fröhlich, Pauli y Homi Bhabha (que era de India, pero trabajaba en Inglaterra).

El mesón nuclear era inestable, con una vida media en reposo que Yukawa estimó de 10^{-7} segundos en 1938. El mismo año, Heisenberg y Hans Euler hallaron, a partir de un análisis de datos experimentales, $2{,}7 \times 10^{-6}$ segundos para la vida del mesotrón de los rayos cósmicos. El valor no cambió mucho cuando se realizaron las primeras medidas directas durante la guerra. Heisenberg y Euler no estaban preocupados por la discrepancia y encontraron el acuerdo «bastante satisfactorio». Tampoco los problemas con la masa del mesotrón hicieron que saltara la alarma entre los físicos. Los experimentos a finales de los treinta no consiguieron proporcionar un valor preciso para la masa del mesotrón, sino valores que variaban considerablemente, de 120 masas electrónicas a 350 o más. Pero los físicos no encontraron la divergencia alarmante y, por un tiempo, consiguieron convencerse a sí mismos de que los mesotrones tenían un valor único de unas 200 masas electrónicas. Del mismo modo, si el mesotrón de los rayos cósmicos era lo mismo que el cuanto pesado de Yukawa, debería interactuar fuertemente con los núcleos. Los experimentos no mostraron la esperada alta probabilidad de captura por materia, pero esta anomalía tampoco provocó que los físicos se cuestionaran la suposición de un solo mesón.

El estallido de la Segunda Guerra Mundial significó naturalmente que el trabajo en física pura, como la teoría mesónica y la investigación en rayos cósmicos, se redujera mucho. Pero no se detuvo totalmente y en varios de los países beligerantes, incluyendo Italia, Japón y los Estados Unidos, se continuaron importantes trabajos a lo largo de los años de guerra. De acuerdo con la teoría aceptada de los mesotrones, propuesta por Tomonaga y Toshima Araki en 1940, las partículas negativas se capturarían y absorbe-

rían en el núcleo, dejando sólo las positivas, que se descompondrían en electrones y neutrinos. Dado que la probabilidad de absorción de un mesón negativo (como llamaré de ahora en adelante a la partícula) era mucho mayor que la probabilidad de desintegración, de acuerdo con la teoría, los mesones negativos deberían absorberse casi completamente y no deberían aparecer electrones procedentes de una desintegración. El efecto Tomonaga-Araki fue confirmado por los tres físicos italianos Marcello Conversi, Oreste Piccioni y Ettore Pancini en 1945, utilizando hierro como material absorbente. Sin embargo, cuando se utilizó grafito en experimentos posteriores el efecto desapareció misteriosamente, y en otros elementos ligeros, los mesones negativos resultaron decaer a un ritmo similar al de las partículas positivas. Este resultado, obtenido a principios de 1947 y rápidamente confirmado en los Estados Unidos, era una anomalía genuina, ya que contradecía la predicción de Tomonaga-Araki. En aquel momento, las dificultades acumuladas por la teoría de un solo mesón ya no podían ignorarse y las cosas de repente progresaron con rapidez. Aunque los físicos italianos no sugirieron ninguna explicación de la anomalía, sus colegas en los Estados Unidos sí lo hicieron.

Durante la primera conferencia en Shelter Island en junio de 1947 (que debatiremos también en el capítulo 22), el experimento italiano fue uno de los temas de discusión. Robert Marshak de la Universidad de Rochester sugirió resolver la anomalía mediante una hipótesis de dos mesones. De acuerdo con esta hipótesis, existían dos tipos distintos de mesones, con diferentes masas y tiempos de vida; las partículas penetrantes y con interacción débil surgían por la desintegración de partículas fuertemente interactuantes en la atmósfera superior. Poco después, tuvo conocimiento de la evidencia de Bristol a favor de dos mesones y se dio cuenta de que encajaba bien con su teoría; junto con Bethe, Marshak desarrolló la idea en una teoría de dos mesones apropiada, que incluía un cálculo del tiempo de desintegración del mesón pesado, con un resultado de unos 10^{-7} segundos. Una propuesta algo similar a la teoría Bethe-Marshak fue formulada independientemente por Sakata y Takesi Inoue en Japón, basándose en una idea anterior de Sakata y Yasutaka Tanikawa.

Otra respuesta al experimento de Conversi, Piccioni y Pancini provino del físico italiano Bruno Pontecorvo, que trabajaba entonces en Canadá (emigraría más tarde a la Unión Soviética). En verano de 1947, Pontecorvo sugirió que el mesón de Anderson-Neddermeyer era un electrón pesado y por tanto pertenecía a lo que más tarde se denominaría la familia de leptones. Pontecorvo se dio cuenta de que la captura de los mesones por los núcleos se parecía a la captura nuclear de electrones y sugirió el proceso $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$, en analogía con el proceso beta inverso $e^- + p \rightarrow n + \nu$. También Oskar Klein en Suecia y Giovanni Puppi en Italia desarrollaron muy poco tiempo después la importante inspiración de que el electrón y el mesón (μ) eran los dos partículas «débiles».

Durante la primavera de 1947, la identificación de una década de la partícula de Yukawa con la de Anderson-Neddermeyer estaba derrumbándose rápidamente. La atmósfera conservadora anterior dio paso a un «severo antidogmatismo», como recordaba Pontecorvo. La única pieza que faltaba en el rompecabezas era ahora la identificación de la partícula fuertemente interactuante de Yukawa.

La primera observación de una desintegración nuclear por un mesón se realizó en enero de 1947, cuando Donald Perkins, un físico de Londres, sugirió identificar un suceso de rayos cósmicos como una partícula «sigma» de masa intermedia reaccionando con un núcleo ligero. Unas semanas después, Cecil Powell y su grupo en la Universidad de Bristol informaron de varias trazas similares en placas fotográficas expuestas a la radiación cósmica. En su comunicación a *Nature* de mayo de 1947, el equipo de Bristol informó de la observación de «mesones dobles», es decir, lo que parecía ser un mesón que se originaba de otro mesón detenido. Sin embargo, fue sólo en otoño de 1947 cuando Powell, junto con Occhialini y el físico brasileño Cesare Lattes, concluyeron que un «mesón π» pesado se desintegraba en un «mesón μ» más ligero (la traza del electrón no era visible en las emulsiones de 1947). Originalmente, los tres físicos concluyeron que la $m_\pi/m_\mu = 2$, lo que implicaba que la desintegración de π a μ estaba acompañada de una partícula pesada neutra. La masa se determinó con precisión tan sólo cuando Lattes fue a Berkeley y produjo artificialmente el mesón π. El resultado, $m_\pi/m_\mu = 1{,}33$, contradecía el valor de Bristol. En consecuencia, Powell y su grupo se vieron forzados a concluir que estaban equivocados y que no había ninguna partícula neutra pesada involucrada en la desintegración. En todo caso, lo importante era que el mesón π (pión) había sido descubierto y que se vio que era distinto del mesón μ (muón), más ligero.

Como los descubrimientos del positrón y del muón, el descubrimiento del pión tampoco estaba relacionado con la teoría. Los físicos dieron la bienvenida al verdadero mesón de las fuerzas nucleares, la masa del cual encajaba bien con la teoría de Yukawa. Pero con el descubrimiento del pión, el estatus del muón cambió y no parecía haber lugar para la partícula de Anderson-Neddermeyer en las teorías físicas. «¿Quién ha encargado esto?» se dice que preguntó sobre el muón Isidore Rabi. El año de 1947 marcó el fin de la primera fase, y el principio de una nueva, en la aún joven disciplina de la física de partículas elementales. El mesón π fue predicho por un físico japonés y la teoría de Yukawa se desarrolló principalmente por físicos teóricos en Europa y Japón; los experimentos con mesones fueron por un tiempo una especialidad italiana; el descubrimiento de 1947 tuvo lugar en Inglaterra por un equipo internacional, que incluía a un italiano y un brasileño; y el descubrimiento, como otros experimentos anteriores, utilizaba como fuente de mesones la radiación cósmica. Después de 1947, la física de partículas cambiaría en muchos aspectos. El campo acabaría dominado por físicos estadounidenses y el papel de la radiación cósmica sería desafiado por los nuevos aceleradores de altas energías. Seguiremos con esta historia en el capítulo 21.

CAPÍTULO 14

Implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica

Incertidumbre y complementariedad

Durante los años que siguieron a 1925, la pequeña población de físicos cuánticos estaba intensamente ocupada no sólo en desarrollar la teoría y aplicarla a nuevas áreas, sino también en entender el fundamento conceptual de la teoría. De manera implícita, y en algunos casos también explícita, los físicos actuaron como filósofos. Schrödinger, como hemos visto, intentó al principio interpretar la mecánica ondulatoria de manera electrodinámica, pero tuvo que admitir que la interpretación era insostenible. Otros físicos sugirieron la hidródinámica en vez de la electrodinámica como la teoría del continuo apropiada sobre la cual podría obtenerse una comprensión semiclásica de la mecánica ondulatoria. Por ejemplo, en 1926 el físico alemán Erwin Madelung desarrolló un modelo hidrodinámico que reproducía algunas características básicas de la teoría de Schrödinger, pero no todas ni muchos menos. Tales modelos o analogías continuaron sugiriéndose tanto antes como después de la Segunda Guerra Mundial, pero no tuvieron éxito y la mayoría de los físicos cuánticos no les prestaban atención. A partir del otoño de 1926, la interpretación probabilista de Born fue aceptada por la mayoría de los físicos, aunque la comprensión precisa e implicaciones de esta interpretación fueron objeto de debate. De Broglie, cuyo trabajo había sido el punto de partida de la mecánica ondulatoria, era reacio a unirse al punto de vista mayoritario. En 1927 propuso como una alternativa una «teoría de la solución doble», que se construía sobre un sistema doble de soluciones a la ecuación de Schrödinger. Según la teoría de De Broglie, una partícula podría describirse como un paquete concentrado de energía, correspondiente a una solución singular, y la partícula sería guiada por una onda ψ continua (una «onda piloto») que se interpretaba de acuerdo con el punto de vista probabilista de Born. De este modo, De Broglie consiguió formular una teoría determinista de la microfísica sin abandonar del todo la inspiración de Born acerca de la naturaleza probabilista de los procesos cuánticos. La teoría de De Broglie fue duramente criti-

cada por Pauli en el congreso de Solvay de 1927, y ni Schrödinger ni Einstein la apoyaron. Decepcionado e incapaz de contestar a las objeciones de Pauli, De Broglie abandonó su teoría. En 1928 ya había abrazado la interpretación de Copenhague favorecida por Born, Heisenberg, Bohr y otros, y durante más de dos décadas siguió siendo un leal partidario de Copenhague.

En 1952 De Broglie volvió a una versión modificada de su teoría de la solución doble y, a partir de ese momento, siguió su propio camino. El mismo año, un enfoque similar al de De Broglie fue adoptado por David Bohm, un joven físico estadounidense quien, hasta entonces, había seguido un ortodoxo camino en su punto de vista de la teoría cuántica. Introduciendo lo que denominó un «potencial cuántico», Bohm consiguió formular una teoría cuántica que, aunque no clásica, retenía algunas características clásicas, como que las partículas se movieran siguiendo trayectorias específicas de acuerdo con el principio de causalidad. La teoría de Bohm fue o bien ignorada o bien criticada por innecesaria, porque meramente reproducía los resultados conocidos de la teoría cuántica ordinaria. Según Heisenberg, era «ideológica», y Pauli la consideraba «metafísica artificial». Hicieron falta unos veinticinco años para que la teoría de Bohm se debatiera ampliamente, e incluso entonces, sólo por una minoría de físicos.

Tras este breve desvío por el periodo de posguerra, volvemos ahora a los dorados años veinte. ¿Cuál era el significado más profundo de la falta de conmutabilidad entre cantidades conjugadas canónicas, como la posición y el momento de una partícula? Esto era, entre otras cosas, lo que Heisenberg respondió con su famoso principio de incertidumbre en la primavera de 1927. (Emplearemos los términos «incertidumbre» e «indeterminación» indistintamente, aunque a veces éstos tienen pueden tener significados algo distintos.) La idea general de este principio fundamental había estado en el aire durante un tiempo y, por ejemplo, se discutía en una carta que Pauli escribió a Heisenberg en octubre de 1926. «La primera pregunta es, por qué sólo las *p*, y en todo caso nunca las *p* y también las *q*, pueden describirse con cualquier precisión», Pauli escribió. «Uno puede ver el mundo con ojos *p* y puede verlo con ojos *q*, pero si uno abre los dos ojos a la vez entonces se pierde» (Hendry 1984a, p. 99). Heisenberg estaba de acuerdo, y respondió que «no tiene sentido hablar de la posición de una partícula de velocidad fija. Pero si uno acepta una posición y velocidad menos precisas, eso sí que tiene sentido» (*ibid.*, p. 111). El mismo tema hizo su aparición en la teoría de transformaciones de Dirac, en diciembre de 1926, que fue una importante referencia para el principio de incertidumbre posterior. Dirac concluía: «No se puede responder a cualquier pregunta sobre teoría cuántica que haga referencia a valores numéricos tanto para la q_{ro} [posición] y p_{ro} [momento] [...] [Si] se describe el estado del sistema en un tiempo arbitrario dando valores numéricos a las coordenadas y momentos, entonces no se puede en realidad construir una correspondencia única entre los valores de estas coordenadas y momentos en el momento inicial y sus valores en un tiempo posterior» (Kragh 1990, p. 42).

Heisenberg se benefició de debates con Dirac, Jordan y Pauli, pero fueron sobre todo sus debates con Bohr sobre los fundamentos de la mecánica cuántica lo que le lle-

varon a la formulación del principio de incertidumbre. Cuando Heisenberg presentó su primera versión del artículo sobre incertidumbre a Bohr, no fue del agrado del físico danés. «Señaló que ciertas afirmaciones en la primera versión todavía tenían un fundamento incorrecto, y como él siempre insistía en una impecable claridad en cada detalle, estos puntos le ofendieron profundamente», recordaba Heisenberg. «Tras varias semanas de discusiones, no desprovistas de estrés, concluimos pronto, con la fundamental participación de Oskar Klein, que realmente queríamos decir lo mismo, y que las relaciones de incertidumbre eran simplemente un caso especial de un principio de complementariedad más general» (Wheeler y Zurek 1983, p. 57).

El artículo de Heisenberg se caracterizaba por el mismo tipo de argumentos positivistas que sirvieron de motivación para su artículo de 1925, en el que se introdujo la mecánica cuántica por vez primera. Su punto de partida era claramente filosófico: «Si se quiere dejar claro qué se quiere decir con las palabras "posición de un objeto", por ejemplo de un electrón [...] entonces se tienen que describir experimentos concretos mediante los cuales se puede medir "la posición de un electrón"; en caso contrario este término no significa nada en absoluto». Es importante notar que Heisenberg no formuló las relaciones de incertidumbre como una doctrina filosófica, sino que las derivó de la mecánica cuántica e ilustró su importancia mediante experimentos imaginarios. Eran (y son) consecuencias de la mecánica cuántica, no el fundamento conceptual de la teoría. Heisenberg mostró que la indeterminación mínima en la posición de una partícula está relacionada con la indeterminación en el momento mediante la expresión $\Delta q \Delta p = h/4\pi$. También mostró que existe una relación de correspondencia entre la incertidumbre en medir la energía de alguna cantidad y la correspondiente incertidumbre en la medida del tiempo: $\Delta E \Delta t > h$.

Las relaciones de Heisenberg se asumieron, se discutieron y se intentaron generalizar o modificar por muchos físicos, incluyendo a Schrödinger, Edward Condon y Howard Robertson. Robertson, un físico de Princeton más conocido por su trabajo en cosmología, probó una versión más general de las relaciones de incertidumbre, válida para cualquier par de variables conjugadas, en 1929. Según el punto de vista de Heisenberg y de la mayoría de los demás físicos, las relaciones de incertidumbre involucraban necesariamente el producto de dos incertidumbres: una de las cantidades (digamos q) podría perfectamente estar determinada con precisión, pero entonces la otra (p) estaría totalmente indeterminada. Durante los intentos de mejorar y generalizar las relaciones de incertidumbre, esta imagen fue cuestionada por varios físicos, que argumentaban que, independientemente de la incertidumbre de una de las variables, la otra no podía en ningún modo ser menor que cierto valor. Arthur Ruark en los Estados Unidos y Henry Flint en Inglaterra abogaron en 1928 por este punto de vista; los dos propusieron $\Delta q = h/mc$. Esta relación y el tiempo mínimo correspondiente $\Delta t = h/mc^2$ disfrutaron de considerable reputación durante 1928 y 1936, cuando recibió el apoyo de autoridades como Pauli, De Broglie y Schrödinger, además de ciertos físicos menos eminentes. Sin embargo, la idea no condujo a aplicaciones físicas interesantes y a finales de los treinta la mayoría de los físicos la había abandonado para volver a la imagen convencional.

Dado que las relaciones de incertidumbre se seguían de la mecánica cuántica, fueron aceptadas prácticamente por todos los físicos. Pero una cosa era aceptar las matemáticas y otra muy distinta ponerse de acuerdo sobre el significado y sus implicaciones filosóficas. ¿Qué quería decir realmente la aparentemente inocente expresión $\Delta q \Delta p = h/4\pi$? Como Heisenberg dejó claro en su artículo de 1927, por lo pronto significaba que el concepto clásico de causalidad debía abandonarse; no porque fuera ilegítimo inferir de una causa presente un efecto futuro, sino porque un sistema físico no podía definirse con precisión jamás. Dado que podemos conocer el presente sólo dentro de las limitaciones impuestas por la mecánica cuántica, de igual modo podemos conocer el futuro sólo imprecisamente. «Dado que todos los experimentos obedecen a las leyes cuánticas y, como consecuencia, las relaciones de incertidumbre, lo incorrecto de la ley de causalidad es una consecuencia bien establecida de la misma mecánica cuántica», argumentaba Heisenberg. «Tampoco en principio podemos conocer el presente con todo detalle. Por esta razón, todo lo observado es una selección de una multitud de posibilidades y una limitación de lo que es posible en el futuro» (Wheeler y Zurek 1983, p. 83). Por supuesto, uno podría imaginar que el futuro fuera causal a cierto nivel más profundo y que la causalidad estuviera confinada sólo al mundo de los fenómenos. Pero desde el punto de vista positivista de Heisenberg, esta objeción no suponía diferencia alguna: «Estas especulaciones nos parecen, para decirlo explícitamente, sin valor ni sentido, ya que la física debe confinarse a la descripción de las correlaciones entre percepciones». Sin embargo, las relaciones de incertidumbre no prohíben necesariamente el determinismo estricto y la causalidad. Durante los años treinta, la cuestión todavía era discutida por muchos físicos y filósofos, y es una cuestión que es todavía objeto de discusión más de setenta años después de que Heisenberg propusiera su principio.

Si bien el principio de incertidumbre de Heisenberg es una consecuencia de la mecánica cuántica, el principio de complementariedad de Bohr no lo es. Es una doctrina considerablemente más amplia y menos definida con propiedad, de una naturaleza principalmente filosófica. Hay pocas dudas de que la formulación del principio debe mucho al trabajo de Heisenberg con incertidumbres cuánticas, pero la idea de complementariedad no era una mera generalización filosófica del principio de Heisenberg. Se originó a partir de reflexiones sobre teoría cuántica que Bohr meditó antes de que Heisenberg presentara su trabajo. Bohr presentó sus ideas sobre complementariedad por primera vez en un congreso internacional de física en Como en otoño de 1927, conmemorando el centenario de la muerte de Volta. En esta ocasión, enfatizó que en el mundo cuántico, al contrario que en el clásico, no puede realizarse nunca una observación de un sistema sin alterarlo. Pero, ¿cómo podemos llegar a conocer entonces el estado del sistema? El postulado cuántico parecería implicar que la distinción clásica entre observador y lo observado ya no sería sostenible. ¿Cómo sería entonces posible obtener un conocimiento objetivo? Las reflexiones de Bohr sobre estas cuestiones y otras relacionadas le llevaron a la introducción de la noción de complementariedad, denotando el uso de puntos de vista complementarios pero mutuamente excluyentes

en la descripción de la naturaleza. Dos años después, definiría el principio de complementariedad como «un nuevo modo de descripción [...] en el sentido de que cualquier aplicación dada de conceptos clásicos impide el uso simultáneo de otros conceptos clásicos que, en una conexión diferente, son igualmente necesarios para elucidación de los fenómenos» (Jammer 1974, p. 95). Ésta era básicamente la formulación más clara del principio de complementariedad, una doctrina notoriamente vaga y ambigua. La descripción ondulatoria y la basada en partículas son complementarias, y por tanto están en conflicto. Pero Bohr argumentaba que el físico todavía es capaz de dar cuenta sin ambigüedades de sus experimentos, ya que es él quien escoge qué medir y destruye así la posibilidad de la materialización del aspecto conflictivo. De acuerdo con Heisenberg, Bohr enfatizó que el objetivo de la física era predecir y coordinar resultados experimentales, no descubrir la realidad tras el mundo de los fenómenos. «En nuestra descripción de la naturaleza», escribió en 1929, «el propósito no es desvelar la verdadera esencia de los fenómenos, sino sólo seguir la pista, tan lejos como sea posible, a las relaciones entre los múltiples aspectos de nuestra experiencia» (Heilbron 1985, p. 219).

Aunque la dualidad onda-partícula es el ejemplo habitual de complementariedad, para Bohr y sus discípulos el principio tenía un significado mucho más amplio. Bohr pronto lo aplicaría a otras áreas de la física, desde cuestiones biológicas, a psicología y cuestiones culturales generales. Por ejemplo, en el Congreso Internacional de Ciencias Antropológicas y Etnológicas en 1938, Bohr explicó que las emociones y las percepciones de las mismas están en una relación de complementariedad análoga a la de las medidas en física atómica. Otros físicos asociados al programa de Copenhague fueron incluso más allá. Jordan, en particular, extrapoló la complementariedad a áreas de psicología, filosofía y biología de una manera tan exagerada que un avergonzado Bohr tuvo que enfatizar que el concepto no tenía nada que ver con el vitalismo y no debía tomarse como una defensa ni del antirracionalismo ni del solipsismo. La extrema interpretación de Jordan del proceso de medidas incluía que las observaciones no sólo perturbaban la cantidad medida sino que, literalmente, la producían. «Nosotros mismos producimos los resultados de la medida», enfatizó en 1934 (Jammer 1974, p. 161).

El principio de complementariedad se convirtió en la piedra angular de lo que más tarde se denominaría la interpretación de Copenhague de la física cuántica. Pauli llegó a declarar que la mecánica cuántica podría llamarse «teoría de la complementariedad», en analogía con la «teoría de la relatividad». Y Peierls afirmaría más adelante que «cuando te refieres a la interpretación de Copenhague de la mecánica lo que quieres decir en realidad es mecánica cuántica» (Whitaker 1996, p. 160). Sin embargo, definir exactamente la interpretación de Copenhague no resulta más claro que definir la naturaleza del principio de complementariedad mismo, lo cual significa que no está muy claro. Es un asunto todavía discutido entre filósofos y algunos físicos con inclinaciones filosóficas. De hecho, el término «interpretación de Copenhague» no se utilizaba en los años treinta sino que ingresó en el vocabulario de los físicos en 1955, cuando Heisenberg lo utilizó al criticar ciertas interpretaciones poco ortodoxas de la mecánica cuántica.

Muchos de los físicos importantes de los años treinta, incluyendo a Pauli, Heisenberg, Jordan y Rosenfeld, se hicieron entusiastas partidarios de la filosofía de complementariedad de Bohr, que consideraban el genuino núcleo conceptual de la mecánica cuántica. Es notable que casi todos los físicos que adoptaron explícitamente el punto de vista de Bohr tenían contactos personales con él y habían sido visitantes de su instituto. Fuera del círculo de Copenhague, la recepción de la filosofía de la complementariedad fue considerablemente más fría, o bien amablemente indiferente o, en unos casos aislados, hostil. Dirac, que tenía cercanas conexiones con los de Copenhague y gran respeto hacia Bohr, no vio sentido alguno a tanta discusión sobre complementariedad. No proporcionaba nuevas ecuaciones y no se podía utilizar para los cálculos que Dirac tendía a identificar con la física (véase también el capítulo 11). Tampoco se convirtieron todos los estudiantes del instituto de Bohr a la filosofía de la complementariedad. Considérese el caso de Christian Møller, que estudió en el instituto entre 1926 y 1932 y que se quedó allí durante toda su vida activa. Aunque Møller era un típico producto de la escuela de Copenhague y estaba fuertemente influido por su espíritu de trabajo, los argumentos de complementariedad no dejaron ninguna traza en sus obras publicadas. Los argumentos le resultaban familiares, por supuesto, pero no estaba particularmente interesado en los amplios problemas conceptuales subrayados por Bohr. Como recordaba en una entrevista de 1963, «aunque escuchábamos cientos y cientos de charlas sobre estas cosas [la complementariedad y los problemas de la medida], y estábamos interesados en ello, no creo, salvo quizá Rosenfeld, que ninguno invirtiéramos mucho tiempo en esto [...] Cuando eres joven, es más interesante atacar problemas definidos. Quiero decir, esto era demasiado general, casi filosófico» (Kragh 1992, p. 304).

Ésta era también la actitud de muchos físicos cuánticos jóvenes, sobre todo en los Estados Unidos, donde la reputación de Bohr de sabio cuántico era mucho más limitada que en Europa. Los problemas «casi filosóficos» no se consideraban atractivos. Los físicos estadounidenses tenían una actitud más pragmática y menos filosófica hacia la física que muchos de los asociados de Bohr. Se enfocaban en experimentos y cálculos específicos y para estos propósitos el principio de complementariedad no les servía. Esto no quiere decir que no hubiera interés en problemas fundamentales entre los estadounidenses, sólo que iba en otras direcciones y tenía lugar en una escala menos grandiosa que en Dinamarca y Alemania. El principio de incertidumbre fue asumido con entusiasmo por varios físicos de Estado Unidos, incluyendo a Kennard, Ruark, Van Vleck, Condon y Robertson, pero casi no mostraron interés en la complementariedad de Bohr. También se puede ver en los libros de texto que empleaban los estudiantes de teoría cuántica lo relativamente modesta que era la importancia contemporánea del principio de complementariedad. La mayoría de los autores de libros de texto, aunque simpatizaran con las ideas de Bohr, encontraban difícil incluir y justificar una sección sobre complementariedad. De cuarenta y tres libros de texto sobre mecánica cuántica publicados entre 1928 y 1937, cuarenta incluían un tratamiento del principio de incertidumbre; sólo ocho mencionaban el principio de complementariedad. A pesar del

hecho de que gran parte de los físicos del mundo no suscribieran la interpretación de Copenhague, o, mejor dicho, que no les importara, la oposición contra ella fue débil y dispersa. Por las razones que fueran, a mediados de los años treinta Bohr había obtenido un éxito notable estableciendo la imagen de Copenhague como la filosofía dominante de la mecánica cuántica.

Contra la interpretación de Copenhague

Quizá el episodio más famoso, y más idealizado, de la historia de la física del siglo XX es el debate entre Einstein y Bohr sobre la interpretación de la mecánica cuántica. Esta serie de discusiones socráticas entre dos profundos y legendarios científicos-filósofos ha pasado a engrosar el folclore de la física y, de hecho, el folclore intelectual en general. Sean cuales sean los detalles de sus discusiones, ocupan un lugar en la historia intelectual occidental comparable a, digamos, la controversia entre Newton y Leibniz hace unos trescientos años. Uno a veces tiene la sensación de que Bohr y Einstein mantuvieron continuas discusiones durante la mayor parte de dos décadas, a veces cara a cara. En realidad, los dos físicos se encontraron personalmente sólo unas pocas veces, y la importancia de sus discusiones se ha exagerado y mitificado en muchos relatos del último cuarto del siglo.

Aunque la mecánica cuántica estaba en deuda con las contribuciones fundamentales de Einstein a la teoría cuántica de 1905 a 1925, al principio Einstein no se interesó mucho por la nueva teoría. Su actitud general era escéptica y negaba, sobre bases más filosóficas que científicas, que el microcosmos sólo pudiera describirse estadísticamente. En una famosa carta a Born de diciembre de 1926, escribía sobre la «voz interior» que le decía que la mecánica cuántica «apenas nos acerca al secreto del Viejo [...]. Estoy convencido de que él no juega a los dados» (Jammer 1974, p. 155). La insatisfacción de Einstein con la interpretación estadística dio lugar a un artículo que presentó oralmente a la Academia prusiana de las Ciencias a principios de 1927. El manuscrito, titulado «¿Determina la mecánica ondulatoria de Schrödinger el movimiento de un sistema completamente o sólo en el sentido de la estadística?» esbozaba una especie de teoría de variables ocultas algo similar a la teoría hidrodinámica de Madelung. Pero puede que Einstein se diera cuenta de que su alternativa no era satisfactoria, ya que nunca envió el manuscrito a publicar.

Einstein no participó en el congreso de Volta, pero estaba entre los participantes del quinto Congreso de Solvay en octubre de 1927, donde Bohr, Dirac, Heisenberg, Pauli, Schrödinger y otros físicos principales discutieron los fundamentos de la mecánica cuántica. Bohr dio una clase sobre sus nuevas ideas de complementariedad, de las que Einstein oyó hablar por primera vez. Einstein no quedó convencido y argumentó que la interpretación de Bohr-Heisenberg, según la cual la mecánica cuántica es una teoría completa de procesos individuales, contradecía la teoría de la relatividad. Discutió distintos experimentos mentales con la esperanza de demostrar que las relaciones de incertidumbre no eran necesariamente válidas y que los fenómenos atómicos podrían

analizarse en mayor detalle que el que especificaban las relaciones de Heisenberg. Cuando Bohr mostró que los argumentos de Einstein eran insostenibles, a Einstein se le ocurrió un nuevo experimento mental, que Bohr de nuevo neutralizó. Según Bohr, la mecánica cuántica (incluyendo las relaciones de incertidumbre) era una teoría total que completaba todas las posibilidades de explicación de los fenómenos observables. No hay duda de que Bohr resultó el «ganador» de las discusiones de 1927 y de que la mayoría de los participantes reconocieron la fuerza de sus argumentos. «Bohr [estaba] por encima de todos», escribió Ehrenfest tras el congreso. «Fue un placer para mí el estar presente durante la conversación entre Bohr y Einstein. Como un juego de ajedrez, Einstein todo el tiempo con nuevos ejemplos [...] Bohr saliendo de nubes de humo filosóficas constantemente en busca de las herramientas con las que aplastar un ejemplo tras otro. Einstein como un resorte: saltando como nuevo cada mañana. Oh, no tuvo precio. Pero estoy, casi sin reservas, a favor de Bohr y en contra de Einstein» (Whitaker 1996, p. 210).

Einstein admitía que Bohr era listo discutiendo, pero no que sus puntos de vista fueran correctos. En una carta a Schrödinger medio año después del Congreso de Solvay, Einstein describía sarcásticamente la interpretación de Copenhague como «la tranquilizante filosofía ¿o religión? de Heisenberg-Bohr». Y añadía que «proporciona una cómoda almohada para el verdadero creyente, de la cual no es muy fácil despertarlo» (Jammer 1974, p. 130). La segunda ronda del célebre debate Einstein-Bohr tuvo lugar durante la siguiente conferencia de Solvay, en octubre de 1930, en un momento en el que la idea de complementariedad de Bohr estaba ganando fuerza entre los físicos europeos. Esta vez, Einstein se centró en la relación de incertidumbre de energía y tiempo ($\Delta E \Delta t > h$), que intentó refutar. Su manera de refutarla fue la misma que la de tres años antes, un experimento mental. En su nuevo experimento, más tarde conocido como el experimento de la caja de fotones, Einstein utilizó la relación masa-energía de la relatividad especial, $E = mc^2$, y argumentó que la energía de un fotón y su tiempo de llegada a una pantalla podían predecirse con precisión ilimitada, en contradicción con la relación de incertidumbre. Pero Bohr respondió brillantemente al desafío, invocando esta vez la fórmula del corrimiento al rojo de la teoría general de la relatividad de Einstein. El resultado de la segunda ronda de debates fue el mismo que el de la primera: la concepción de la mecánica cuántica de Bohr resultó fortalecida y el escepticismo de Einstein parecía injustificado. Hasta entonces, Einstein había intentado refutar la mecánica cuántica mostrando que las relaciones de incertidumbre eran erróneas; su creencia en la causalidad fundamental permaneció imperturbada, y en los años treinta trasladaría el enfoque de sus objeciones desde la inconsistencia hacia la incompletitud.

El significado estadístico de la función ondulatoria no excluye necesariamente la posibilidad de que los sucesos atómicos individuales estén determinados por parámetros todavía no descubiertos. La hipótesis general de un subnivel de parámetros bien definidos de este tipo tiene una larga historia en las ciencias físicas y se remonta a antes de la mecánica cuántica. Para mencionar un solo ejemplo, los intentos a principios

del siglo XX de explicar la radiactividad causalmente utilizaron una versión de la hipótesis (véase capítulo 4). La posibilidad de «variables ocultas» se reconoció muy pronto en la mecánica cuántica, pero dado que los hipotéticos parámetros no tenían significación física, no recibieron mucha atención. Sin embargo, era una posibilidad, y una atractiva, para aquellos a quienes la interpretación de Copenhague no agradaba. Si la mecánica cuántica pudiera formularse con variables ocultas y si reproducía todos los resultados de la teoría estándar, parecería no haber una poderosa razón para que los físicos aceptaran la imagen de Copenhague del mundo atómico.

La cuestión de las variables ocultas era uno de los problemas examinados por el matemático húngaro-estadounidense John von Neumann en un libro de 1932 titulado *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (*Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*). Von Neumann proporcionó una formulación matemática precisa de los fundamentos de la mecánica cuántica, basando la teoría en el uso de espacios de Hilbert. En un trabajo de 1933, el físico francés Jacques Solomon llegó independientemente a la misma conclusión, que los parámetros son inconsistentes con el formalismo aceptado de la mecánica cuántica.

En una pequeña parte de su importante libro, Von Neumann probó que una imagen causal de la mecánica cuántica basada en variables ocultas no es posible. Imaginemos dos sistemas descritos por la misma función ψ. Medidas idénticas conducirán en general a resultados distintos, lo cual, según la interpretación estándar, es debido a que la mecánica cuántica es acausal. Pero ¿no podría explicarse si los dos sistemas difirieran en algunos parámetros ocultos que determinarían el resultado de las medidas? Lo que Von Neumann probó es que no era así. Según Von Neumann, «no es por tanto, como muchas veces se supone, una cuestión de reinterpretación de la mecánica cuántica: el sistema actual de la mecánica cuántica tendría que ser objetivamente falso para que fuera posible otra descripción de los procesos elementales distinta de la estadística» (Pinch 1977, p. 185). Por otro lado, Von Neumann admitía la ligera posibilidad de que la mecánica cuántica fuera errónea. Dado que era una teoría física, no podía probarse matemáticamente: «Por supuesto, sería una exageración mantener que nos hemos librado de la causalidad [...] A pesar del hecho de que la mecánica cuántica está en buen acuerdo con los experimentos, y de que nos ha abierto una parte del mundo cualitativamente nueva, uno nunca puede decir de la teoría que está probada por la experiencia, sino sólo que es la recopilación mejor que se conoce de la experiencia» (Jammer 1974, p. 270).

A pesar de las palabras de precaución de Von Neumann, su prueba matemática se aceptó ampliamente y a veces se tomó como prueba de la interpretación de Copenhague. Existían, de hecho, considerables diferencias entre la posición de Bohr y la interpretación de Von Neumann, pero raras veces se señalaban las distinciones. Por ejemplo, «el problema de la medida» no era el mismo para Bohr y para Von Neumann. Bohr tendía a verlo como un problema a la hora de generalizar el marco clásico para evitar contradicciones entre dos conceptos clásicos mutuamente incompatibles, ambos necesarios en la descripción de los experimentos. Su solución era la complementariedad.

Para Von Neumann, por otro lado, el problema de la medida significaba el problema matemático de probar que el formalismo predecía lo mismo para distintas colocaciones del «corte» entre el observador y el objeto. El papel de la conciencia humana en el proceso de medida era parte de la discusión cuántico-filosófica en los años treinta. Von Neumann argumentaba que el elemento de la conciencia no podía excluirse y, en un monográfico de 1939, Fritz London y Edmond Bauer sostuvieron explícitamente que la reducción de la función ondulatoria era el resultado de una actividad consciente de la mente humana. «Parece como si el resultado de una medida estuviera íntimamente ligado a la conciencia de la persona que lo realiza, y como si la mecánica cuántica nos llevara así hacia un completo solipsismo», escribieron, sólo para argumentar que el nuevo papel de la conciencia observadora no destruía la objetividad después de todo. Bajo un espíritu positivista, hicieron notar con satisfacción que nada en la situación de la medida nos «impediría predecir o interpretar resultados experimentales» (Wheeler y Zurek 1983, p. 258).

Es debatible cómo de grande fue el papel que la prueba de imposibilidad de Von Neumann desempeñó en el proceso que condujo a la hegemonía de Copenhague, ya que la mayoría de los físicos ya creía que existían buenas razones empíricas para apoyar la postura de Bohr y sus aliados. Por otro lado, la autoridad matemática de Von Neumann ayudó mucho al proceso y se hacía referencia a su prueba como la última palabra sobre el asunto. Casi ningún físico se embarcó en un estudio crítico de la prueba, y muchos de los físicos que se referían a ella probablemente sólo la habían hojeado (o sólo habían oído hablar de ella: hasta 1955 el libro de Von Neumann existía sólo en alemán). Los pocos filósofos que tenían la competencia y el valor de criticarla no fueron tomados muy en serio. Tan sólo en los años cincuenta, cuando se revitalizó el debate sobre las variables ocultas, el argumento de Von Neumann pasó a ser objeto de un examen crítico. Resultó entonces, como mostró el físico británico John Bell a mediados de los sesenta, que la pretendida prueba de Von Neumann no eliminaba, de hecho, todas las teorías que operaran con parámetros ocultos. Bell, que desempeñó un papel principal en el debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica, se inspiró en la teoría de Bohm y estaba en general a favor de las teorías de variables ocultas.

¿Es completa la mecánica cuántica?

Tras su «derrota» en 1930, Einstein continuó pensando profundamente sobre la situación epistemológica en la mecánica cuántica, convencido de que debía ser posible una descripción causal y exacta de los fenómenos naturales. En la primavera de 1935, ya instalado en los Estados Unidos, Einstein publicó, junto con sus jóvenes colegas de Princeton Boris Podolsky y Nathan Rosen, un breve pero famoso artículo titulado «¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?». La versión final del artículo fue escrita por Podolsky y formulada en una manera que Einstein no aprobaba totalmente. Los tres autores empezaban sosteniendo que los conceptos físicos deberían corresponder a aspectos de la realidad física. Su criterio de

realidad era éste: «Si, sin perturbar de ninguna manera un sistema, podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad igual a uno) el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física que corresponde a esta cantidad física». La correspondencia conducía a una condición necesaria para la completitud de una teoría física: «Cada elemento de la realidad física debe tener una parte correspondiente en la teoría física». Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) ahora argumentaban que la mecánica cuántica combinada con el criterio de realidad conducía a una contradicción y que la única alternativa era aceptar que una descripción mecánico-cuántica de la realidad no es completa. El argumento del artículo EPR era esencialmente negativa, en sentido de que se proponía debilitar la imagen estándar de la mecánica cuántica sin proponer una alternativa. En su conclusión, Einstein y sus colaboradores «dejaban abierta la cuestión de si existe o no una descripción tal [completa]», añadiendo, «creemos, sin embargo, que una teoría así es posible» (Wheeler y Zurek 1983, pp. 138-141).

Bohr quedó muy perturbado por el argumento EPR y empezó enseguida a desarrollar un argumento en contra, que tuvo listo tras un periodo de unos cinco meses (en el caso de Bohr, un pensador metódico, esto era rápido). Su línea argumental principal era un rechazo del criterio de realidad física propuesto por Einstein, Podolsky y Rosen. En su opinión, el criterio era inválido porque presuponía que el objeto y el aparato de medida se podían analizar por separado; esto no era posible según el punto de vista de Copenhague, en el que formaban un único sistema. En el cuidadoso pero retorcido estilo de Bohr:

> Un criterio de realidad como el propuesto por los mencionados autores contiene [...] una ambigüedad esencial [...] acerca del significado de la expresión «sin perturbar de ninguna manera un sistema». Por supuesto, en un caso como el que se acaba de considerar no hay cuestión de una perturbación mecánica del sistema que se investiga durante la última fase crítica del procedimiento de medida. Pero incluso en esta fase existe esencialmente la cuestión de *una influencia sobre las condiciones mismas que definen los tipos posibles de predicciones acerca del comportamiento futuro del sistema*. Dado que estas condiciones constituyen un elemento inherente de la descripción de cualquier fenómeno que pueda describirse adecuadamente con el término «realidad física», vemos que la argumentación de los autores mencionados no justifica su conclusión de que la descripción mecánico-cuántica es esencialmente incompleta. (*ibid.*, p. 148, cursiva en el original)

Mientras que el argumento EPR se hizo extremadamente famoso en los años sesenta y posteriormente, en los años treinta esta tercera ronda del debate Bohr-Einstein no suscitó gran interés entre los físicos. El artículo EPR no tuvo éxito para convencer a los físicos de que abandonaran la interpretación de Copenhague, y la impresión general era la de que Bohr había respondido de nuevo satisfactoriamente a las objeciones de Einstein. Simplemente, confirmó a los físicos cuánticos ordinarios lo que siempre habían pensado: que Einstein y sus aliados («los viejos y conservadores caballeros», como Pauli los describió en una carta a Schrödinger) estaban irremediablemente fue-

ra de onda con el desarrollo. La gran mayoría de los físicos parece haber estado simplemente poco interesada. Podían encontrar fácilmente cosas más útiles que intentar entender argumentos filosóficos sin relevancia para su labor diaria como físicos.

Los físicos más inclinados hacia la filosofía, sin embargo (entre ellos, Schrödinger), se interesaron mucho por la discusión EPR. En unas contribuciones en 1935, el padre de la mecánica ondulatoria apoyó el punto de vista de Einstein y desarrolló sus propias objeciones a la postura de Bohr sobre la teoría cuántica. En una de estas contribuciones, propuso un argumento, distinto del de EPR, contra la completitud de la mecánica cuántica. Como es bien conocido, ilustró su argumento mediante un experimento mental que involucraba a un pobre gato confinado en una cámara con una cantidad de material radiactivo y un instrumento diabólico que, al dispararse por una desintegración, liberaría vapores mortales de cianuro. La paradójica conclusión de Schrödinger era ésta: «Si se ha dejado todo este sistema solo durante una hora, se puede decir que el gato todavía vive si durante este tiempo ningún átomo se ha desintegrado. La primera desintegración atómica lo hubiera envenenado. La función ψ de todo el sistema expresaría esto incluyendo al gato vivo y al muerto (perdón por la expresión) mezclado o repartido en partes iguales» (Whitaker 1996, p. 234). Si se seguía de la interpretación de Copenhague que un gato estaría «medio muerto» y recibiría una función de onda $\psi_{gato} = 1/2\ (\psi_{vivo} + \psi_{muerto})$, ¿no indicaría esto que debería preferirse otra interpretación? La paradoja del gato de Schrödinger se hizo inmensamente popular a partir de 1970 aproximadamente, llegando hasta las camisetas de escolares y muchos otros lugares, pero en los años treinta no suscitó mucho debate. Bohr no respondió, quizá porque encontró sus premisas muy evidentemente fallidas. Después de todo, según su punto de vista, a un cuerpo macroscópico como el de un gato, o una botella con cianuro, no podía asignársele una función ondulatoria. Dentro del marco de la intepretación de Copenhague, no había paradoja que resolver. Tampoco parece que Schrödinger haya considerado la paradoja del gato nada paradójica. La describió como «un caso bastante ridículo» y consideró que su lección era un aviso en contra de la ingenua aceptación de un «modelo borroso» para representar la realidad. Como señaló: «En sí mismo [el ejemplo del gato] no entrañaría nada poco claro ni contradictorio. Existe una diferencia entre una fotografía movida o desenfocada y una imagen de nubes y bancos de niebla» *(ibid.)*.

CAPÍTULO 15

El sueño de Eddington y otras heterodoxias

La física en los años treinta no fue una cadena ininterrumpida de nuevos descubrimientos y avances teóricos que condujeran a una comprensión superior y más correcta del mundo cuántico. Al mismo tiempo que la física nuclear florecía y los muchos problemas de la teoría cuántica finalmente daban lugar al progreso, se invertía mucho trabajo en programas de investigación alternativos. Algunos de ellos eran muy ambiciosos y tenían como objetivo la formulación de lo que habría sido, efectivamente, una nueva fundamentación de la física. Los intentos eran claramente poco ortodoxos, y así se consideraron entonces, pero a pesar de ello atrajeron un gran interés. Aunque fueran muy diversos, muchos de ellos tenían en común que la física se conectara íntimamente con la cosmología. A escala filosófica, tenían una clara orientación hacia el racionalismo y razonamientos apriorísticos. La tendencia era principalmente un fenómeno británico; aunque inspiró a varios físicos en Europa y Norteamérica, sólo tuvo importancia duradera en Gran Bretaña. Los intentos de establecer una cosmofísica fallaron, y hoy en día se han olvidado casi totalmente. Así que, ¿por qué prestarles atención? En primer lugar, esta atención supone un saludable antídoto contra la concepción lineal y simplista del progreso científico. Durante cada periodo de la historia de la ciencia, la física ordinaria se ha visto desafiada por postulados heterodoxos, y muchas veces es sólo en retrospectiva cuando podemos ver qué correspondía a las avenidas del progreso y qué a los callejones sin salida de las equivocaciones. En segundo, algunos de los enfoques y objetivos de la fallada revolución cosmofísica de los años treinta continuaron desempeñando un papel en el periodo de posguerra y son todavía interesantes para algunos físicos y astrónomos modernos.

El fundamentalismo de Eddington

Arthur Eddington era no sólo uno de los más eminentes astrónomos teóricos del mundo, sino también un pionero en cosmología y una autoridad en teoría general de la relatividad (y, además, un exitoso autor de exposiciones populares de ciencia y filo-

sofía). Su fascinación con la teoría de Einstein le había convencido de que el método del cálculo tensorial (el método matemático de la relatividad general) era la única manera de estudiar la física en su nivel más fundamental. Quedó por lo tanto muy perturbado cuando se dio cuenta que la ecuación de Dirac de 1928 para el electrón no estaba expresada en forma tensorial, y decidió generalizar y reinterpretar la ecuación. Los intentos de formular la ecuación de Dirac dentro del marco matemático de la teoría de la relatividad general fueron comunes entre los físicos matemáticos alrededor de 1930, pero el de Eddington era un punto de partida para una teoría más grandiosa de todo el mundo de la física. Le inspiró a desarrollar un nuevo tipo de teoría física radicalmente nuevo y a embarcarse en un programa que proseguiría hasta su muerte en 1944.

Según Eddington, un electrón no podía considerarse una partícula individual, sino que debía describirse en conexión con todos los otros electrones del universo, una imagen que abría lo que él consideraba una profunda conexión entre la microfísica y la cosmología. Siguiendo el camino de unificacionistas previos, uno de los objetivos de Eddington era reducir las contingencias en la descripción de la naturaleza, por ejemplo, explicando las constantes fundamentales de la física en vez de aceptarlas como datos meramente experimentales. Una de estas constantes era la constante de estructura fina $\hbar c/e^2$, que aparecía de manera prominente en la teoría de Dirac y cuyo valor se sabía cercano a 1/137. Otra constante adimensional que se pensaba de importancia fundamental alrededor de 1930 era la razón de masas entre los dos bloques constituyentes de la materia, el protón y el electrón (M/m = 1838). Eddington argumentaba que se podía deducir que el valor del inverso de la constante de estructura fina sería el número entero 136. En 1936, después de que los experimentos mostraran que el valor estaba próximo a 137, produjo argumentos de que el número debía incrementarse en una unidad. En cuanto a la razón de masas protón/electrón, sugirió que este número era la razón entre las soluciones de la ecuación cuadrática para las masas $10m^2 - 136m + 1 = 0$. Mientras que estos números son pequeños y no están conectados directamente con el universo en general, Eddington sugirió que las constantes de la naturaleza podían también estar relacionadas con magnitudes cosmológicas, la más importante de las cuales era, en su opinión, el «número cósmico». Este número, N, es el número de electrones (o protones) en la porción observable del universo, aproximadamente 10^{79}. El número se puede estimar a partir de la densidad media del universo, pero Eddington sostenía que era capaz de deducirlo de su teoría, como $N = 2 \times 136 \times 2^{256} = 3{,}15 \times 10^{79}$. Además, argumentaba que estaba relacionado con otras constantes de la naturaleza mediante fórmulas como $\pi e^2/GmM = (3N)^{1/2}$, siendo G la constante de gravitación universal de Newton.

El método de Eddington para derivar la relación entre constantes cósmicas y atómicas cambió según su programa de investigación avanzaba, y también los resultados que obtuvo, pero no demasiado. En 1936 compiló y elaboró sus resultados en *Relativity Theory of Electrons and Protons*, un trabajo que era tan señaladamente ambicioso como fallido. Según Eddington, un conocimiento adecuado del universo (en sus dos aspectos, microscópico y cósmico) requería necesariamente de la extracción del signi-

ficado de las constantes fundamentales, como la carga elemental, la constante de Planck, las masas del electrón y del protón, la constante gravitatoria, la velocidad de la luz y el número cósmico. Asociando deliberadamente su postura con los razonamientos de Pitágoras y Kepler, escribió en 1935: «Debemos así contemplar el universo como una sinfonía interpretada sobre siete constantes primitivas, como música interpretada sobre las siete notas de una escala» (Kragh 1982a, p. 82). El núcleo del programa de Eddington era su intento de deducir los valores numéricos de combinaciones adimensionales de constantes naturales a partir de consideraciones epistemológicas y conectarlas con el gran número definitivo, el número cósmico.

Es imposible describir los métodos de Eddington en pocas líneas. No sólo eran complejos, sino que también cambiaron según su investigación progresaba. Pero su fundamento epistemológico se mantuvo básicamente igual. Este fundamento era que la ecuación de Dirac describe la relación estructural del electrón (o del protón) con todo el universo, en el sentido de que la ecuación de ondas del electrón y las ecuaciones de campo de la relatividad general correspondientes al universo en expansión tienen validez simétrica. La estructura, más que la sustancia, era la esencia de la física. Más generalmente, Eddington creía que era posible obtener conocimiento sobre las leyes fundamentales de la naturaleza a partir de las peculiaridades de la mente humana. «Todas las leyes de la naturaleza que se suelen clasificar como fundamentales» escribió, «pueden predecirse totalmente a partir de consideraciones epistemológicas. Corresponden a un conocimiento apriorístico y son, por tanto, *totalmente subjetivas*» (*ibid.*, p. 84; cursiva en el original).

El punto de vista de Eddington se ha categorizado como «subjetivismo selectivo»: la idea de que nuestro equipamiento sensorial e intelectual tiene un efecto selectivo en el sentido de que determina en gran parte nuestro conocimiento del mundo natural. No negaba la existencia de un mundo objetivo, pero lo identificaba con el mundo consciente y espiritual, no con el mundo fenoménico que los físicos estudiaban experimentalmente. Si las leyes de la naturaleza son esencialmente las construcciones subjetivas de los físicos, quedaba poco espacio en la física fundamental, o ninguno, para el método empírico-inductivo. Según Eddington, su teoría «no se apoya en [...] comprobaciones experimentales. Es incluso más puramente epistemológica que la teoría macroscópica [...] Debería ser posible juzgar si el tratamiento matemático y las soluciones son correctos, sin buscar la solución en el libro de la naturaleza» (*ibid.*).

El acuerdo con los experimentos no desempeñaba un papel importante para Eddington, pero por supuesto no podía ignorar del todo los avances en el conocimiento empírico que tuvieron lugar en los años treinta. Por ejemplo, había supuesto al principio que las partículas elementales incluían sólo electrones y protones, y cuando se descubrieron nuevas partículas (como positrones y mesones), tuvo que incorporarlas de algún modo en su sistema. Eso fue lo que hizo, pero de un modo que era claramente *ad hoc* y resultaba artificial para la mayoría de los físicos. Similarmente, su uso de principios mecánico-cuánticos difería de la imagen ordinaria de la mecánica cuántica. Eddington se apoyaba en el principio de incertidumbre de Heisenberg para argumentar

que la teoría cuántica implicaba consideraciones sobre el universo en su totalidad y que los objetos físicos aislados no tenían propiedades mensurables; pero su uso del principio de incertidumbre era exageradamente distinto de la interpretación habitual de la mecánica cuántica. Lo mismo se aplicaba al idiosincrásico uso de Pauli del principio de exclusión, sobre la base del cual intentó construir una teoría de todas las interacciones fundamentales.

Eddington desarrolló su sistema cosmofísico en un gran número de artículos y libros, pero no consiguió convencer a muchos otros físicos sobre su solidez. Con pocas excepciones, su teoría encontraba escepticismo o indiferencias. A final de su vida, se ocupó en escribir un explicación comprehensiva y revisada de su teoría, pero murió antes de completar la obra. El libro, titulado *Fundamental Theory,* fue publicado de manera póstuma en 1946. Aunque fue estudiado por algunos físicos y filósofos, su impacto fue limitado. Como versiones anteriores de la teoría de Eddington, tenía reputación de ser difícil, idiosincrásico y oscuro, aunque también fascinante. Los dos libros de 1936 y 1946 llegaron a ser famosos, pero más por su oscuridad que por sus méritos científicos.

A pesar del fracaso de Eddington, su grandioso proyecto no dejó de tener implicaciones y también contó con ciertos apoyos. Schrödinger consideraba atractivo el enfoque de Eddington y, a finales de los años treinta, lo asumió vigorosamente para construir una teoría unificada de la mecánica cuántica y la cosmología relativista. El objetivo de Schrödinger era explicar la cuantización en término de las ecuaciones de campo relativistas que gobiernan el universo y, en este sentido, dar prioridad a la teoría clásica de campos sobre las discontinuidades cuánticas. Como escribió a Sommerfeld en 1937, «el mundo es finito y por tanto atomístico; porque un sistema finito posee frecuencias finitas propias. Y de esta manera la teoría general de la relatividad da a luz a la teoría cuántica» (Rueger 1988, p. 395). Aunque Schrödinger no pudo completar su estrategia de unificación, su intento le llevó a estudios pioneros sobre ondas cuánticas en modelos de mundos cerrados, tanto estáticos como en expansión. Entre otros resultados, halló que en un universo en expansión, existía la posibilidad de que se formaran partículas a partir del vacío. Por aquel entonces, estos resultados y otros no fueron apreciados, pero en retrospectiva, marcan el comienzo de una línea de investigación dedicada a la interacción de campos cuánticos y campos gravitatorios. Fue sólo mucho después, en los años setenta, cuando este tipo de estudio se reconoció como un área interesante entre astrofísicos y especialistas en teorías cuánticas de la gravedad (véase capítulo 27).

La cosmonumerología y otras especulaciones

Eddington no fue el primero en reclamar atención sobre la posible significación de las combinaciones adimensionales de constantes naturales, pero fue su trabajo en particular el que estimuló a muchos físicos a que emprendieran investigaciones similares. Por ejemplo, consideremos al reputado físico alemán Reinhold Fürth, quien en 1929

utilizó su propia versión de la teoría de Eddington para deducir, de manera puramente teórica, que el cociente de masas protón/electrón era de 1.838,2. Además, sostuvo que la masa del hipotético neutrón (un sistema mixto protón-electrón) podía expresarse con la fórmula $M_n = 16^{16} (hc/\pi G)^{1/2}$. Fürth era sólo uno de los muchos físicos del periodo que se tomó en serio tales argumentos numerológicos. Otros de los epígonos de Eddington se concentraron en la microfísica y números pequeños, otros en cosmología y números muy grandes, y muchos intentaron establecer relaciones numéricas entre magnitudes atómicas y cosmológicas. Arthur Haas, el físico austriaco-estadounidense que en 1910 introdujera el cuanto de acción en la teoría atómica (capítulo 4), fue otro prolífico eddingtoniano. En 1934 publicó *Die Kosmologischen Probleme der Physik (Los problemas cosmológicos de la física)* y dos años más tarde, tras dejar Viena por Estados Unidos, dedujo la masa del universo a partir de suposiciones básicas pero arbitrarias.

Los trabajos de Fürth y Hass son ejemplares de un tipo de especulación numerológica que disfrutó de cierta popularidad en la década, pero la mayor parte de los físicos corrientes se daban cuenta de que las coincidencias no tenían fuerza explicativa y en consecuencia las ignoraron, o las ridiculizaron, como hicieron Hans Bethe, Guido Beck y Wolfgang Riezler en un artículo satírico en la revista alemana *Die Naturwissenschaften* de 1931. Los tres jóvenes físicos pretendían derivar la temperatura del cero absoluto a partir de la teoría de Eddington, como $T_0 = -(2/\alpha - 1)$ grados, donde α es la constante de estructura fina. Como comentaron jocosamente, «insertando $T_0 = -273°$, obtenemos para $1/\alpha$ el valor 137, en perfecto acuerdo dentro los límites de precisión con el valor obtenido por métodos totalmente independientes». Cuando se descubrió que el artículo era una broma, el editor de la revista pidió disculpas por los malos modales de los tres físicos y explicó que la parodia había «intentado caracterizar cierta clase de artículos de física teórica en los años recientes que son puramente especulativos y basados en acuerdos numéricos espurios».

Sin embargo, la distancia entre especulación e imaginación fructífera es a menudo estrecha, y la numerología al estilo de Eddington atrajo no sólo a físicos de segunda fila. Como veremos pronto, Dirac creía que las coincidencias numéricas tenían un profundo significado. En un artículo de 1929, Sommerfeld, un físico que no se sentía atraído por las especulaciones sin base, estimó que la derivación de la constante de estructura fina proporcionada por Eddington era «extremadamente bella y satisfactoria». Otros eminentes físicos, entre ellos Lewis, Landau, Gamow, Jordan y Chandrasekhar, admitieron una debilidad por el tipo de razonamiento numerológico que Eddington cultivaba, aunque ninguno de ellos aceptara su teoría.

La numerología no era la única forma de teoría especulativa que floreció en los años treinta. Por ejemplo, existía una tradición minoritaria, que se remontaba a mediados de los años veinte (y con raíces mucho más atrás) que examinaba la hipótesis del espacio-tiempo continuo. Esta hipótesis adoptaba distintas formas, pero por lo general incluía la noción de una longitud mínima y la noción correspondiente de átomos temporales o duraciones mínimas. Sobre 1930, varios físicos sugirieron la idea de ato-

micidad temporal y la utilizaron en sus intentos de explicar fenómenos en la radiación cósmica, el número máximo de elementos químicos, los infinitos en electrodinámica cuántica y algunos otros problemas. Como se mencionó en el capítulo 13, De Broglie, Schrödinger, Infeld, Pauli, Landau y Heisenberg, todos debatieron seriamente la propuesta de que el espacio y el tiempo podían estar sometidos a incertidumbres cuánticas absolutas, que se suponían típicamente del tipo $\Delta q = h/mc$ y $\Delta t = h/mc^2$.

Otros físicos menos reputados publicaron teorías del espacio-tiempo discreto que, sin embargo, establecían escasos contactos con la física experimental o con los problemas teóricos de actualidad en la teoría cuántica. En algunos casos, estas teorías se inspiraban en el intento de Eddington de establecer una teoría unitaria de lo muy pequeño y lo muy grande. El intento más elaborado de formular una nueva física basada en la noción de un espacio-tiempo discreto era quizá el del físico polaco-estadounidense Ludwik Silberstein, quien publicó un monográfico sobre el asunto en 1936. Según Silberstein, todas las leyes de la física, incluyendo la teoría de la relatividad, perdían validez para intervalos temporales del orden de 10^{-18} segundos. No pensaba que esto fuera problemático ya que, como escribió, «todos los físicos modernos tienden a creer que nuestra física habitual, molar, incluyendo nuestros conceptos de espacio y tiempo, es inaplicable en estas circunstancias» (Kragh y Carazza 1994, p. 460). Aunque la idea general de abandonar el espacio-tiempo continuo a distancias extremadamente pequeñas no era extraña para los principales físicos teóricos de los años treinta, pocos de ellos se tomaron la idea con seriedad. La hipótesis nunca se desarrolló en una teoría empíricamente fructífera y permaneció desconectada de la teoría fundamental. Sin embargo, ni el fundamentalismo eddingtoniano ni las teorías del espacio-tiempo discreto desaparecieron de la escena de la física por completo. Tras la Segunda Guerra Mundial, continuaron siendo cultivadas por una minoría de físicos que no se amilanaron por la larga sucesión de fracasos.

Milne y la cosmofísica

Edward Milne, un brillante astrofísico que fue investido catedrático de matemática aplicada en la Universidad de Manchester a los 29 años y que trabajó desde 1929 como catedrático en Oxford, desarrolló su propio sistema original de cosmofísica. En algunos aspectos, su sistema difería marcadamente del de Eddington. Por ejemplo, mientras que la unificación de la física cósmica y la atómica estaba en el corazón del programa de Eddington, Milne no encontraba estos intentos de unificación interesantes ni útiles. Sin embargo, en lo concerniente a los aspectos fundamentales del razonamiento científico legítimo, los dos sistemas tenían mucho en común. Ambos eran grandiosos y ambiciosos proyectos de reconstrucción, más cerca de las *Weltanschauungen* que de las teorías físicas ordinarias. Y tanto Eddington como Milne argumentaban a favor del deductivismo, una especie de razonamiento sinóptico basado en principios apriorísticos, a partir de los cuales las leyes de la naturaleza serían deducibles mediante la inferencia racional. Milne empezó a desarrollar su teoría cosmológica en 1933 y la ex-

tendió gradualmente para cubrir también otros aspectos de la física. En 1948 proporcionó una presentación comprehensiva de su teoría, pero por aquel entonces el interés en la teoría estaba en declive.

En opinión de Milne, la teoría general de la relatividad era monstruosa, tanto matemática como filosóficamente. Para él, el espacio no era un objeto de la observación sino un sistema de referencia, y por tanto no podía tener estructura, curvada o no. En su sistemática presentación de su teoría de 1935, *Relativity, Gravitation and World-Structure*, argumentaba que todas las leyes fundamentales de la física cósmica podían deducirse a partir de unos pocos principios, la mayoría de los cuales podían obtenerse analizando los conceptos utilizados para ordenar la experiencia temporal y para comunicarlos mediante señales ópticas. La física que resulta de estas consideraciones sería una «relatividad cinemática», como Milne denominó a su sistema, porque no involucraba una apelación inicial a suposiciones dinámicas o gravitatorias.

Los postulados básicos del sistema del mundo de Milne eran la constancia de la velocidad de la luz y el principio cosmológico, según el cual el mundo es homogéneo e isotrópico a gran escala. Basándose en estos dos principios, y sin utilizar las ecuaciones de campo de la relatividad general, Milne derivó un modelo de un mundo en expansión uniforme y también halló que la constante gravitatoria de Newton no era realmente constante. Según Milne, se incrementaba lentamente con el tiempo, en concreto, $G \sim t$. Sin embargo, el sentido físico de esta proporcionalidad no estaba muy claro, y Milne no creía que fuera comprobable. El motivo es que la totalidad del sistema de Milne era absolutamente convencionalista y que aplicaba distintas escalas temporales, cada una con sus propias implicaciones físicas, pero todas convenciones que podían utilizarse, en principio, libremente. Esta relación sería válida en el «tiempo cinemático» (t), pero no en el marco temporal habitual, newtoniano (τ), que Milne denominaba «tiempo dinámico». Las dos escalas temporales estaban conectadas de manera logarítmica mediante la regla $\tau = \log(t/t_0) + t_0$, donde t_0 significa el instante actual. De este modo, en la escala temporal dinámica G se reducía a una constante y el universo permanecía estacionario y tenía una edad pasada infinita. En cuanto a la pregunta sobre cuál de las escalas temporales proporcionaba la representación correcta del universo, Milne la consideraba carente de significado. Según él, las dos descripciones eran meramente dos versiones diferentes de la misma realidad física y declaró lo «realmente ocurrido» una pregunta sin legitimidad científica.

El sistema de relatividad cinemática de Milne difería claramente de la física tradicional, no sólo en sus resultados sino también en su metodología, que era una peculiar mezcla de positivismo y racionalismo. Creía que el universo contenía un número infinito de partículas, pero se daba cuenta de que este resultado no era verificable y enfatizaba que su física cósmica dependía en última instancia del razonamiento filosófico. Por ejemplo: «Mientras que es concebible que la observación podría verificar la existencia de un número finito de objetos en el universo no es concebible que pueda verificar la existencia de un número infinito. El filósofo puede reconfortarse con el hecho de que, a pesar de la muy alabada influencia y dominio de la observación y experi-

mento en la física ordinaria, la física cósmica propone cuestiones de un carácter objetivo, no metafísico, que no pueden resolverse mediante la observación sino que deben resolverse, en todo caso, mediante la razón pura: la filosofía natural es algo mayor que la totalidad de las observaciones concebibles». Y en 1937 escribió sobre su programa: «Mi propósito ha sido desarrollar las consecuencias [de mi teoría] sin recurrir a la experiencia, excepto a la existencia de una experiencia temporal, una conciencia de una relación de antes y después, para cada observador individual» (Kragh 1982a, p. 78). Aunque el sistema de Milne se aplicaba principalmente a la cosmología, también creía que le permitía deducir la dinámica, el electromagnetismo, e incluso la teoría atómica a partir de principios puramente cinemáticos. Enfatizó que su enfoque deductivo contrastaba con el ordinario, empírico-deductivo, y se oponía a los intentos reduccionistas de entender las leyes del universo en términos de teoría atómica. Fuera de la cosmología, sin embargo, el intento de Milne de reconstruir la física resultó en un singular fracaso, y simplemente no fue tomado en serio por sus colegas en física.

En junio de 1938 una conferencia sobre «Nuevas teorías en física» tuvo lugar en Varsovia bajo los auspicios del Instituto Internacional de la Cooperación Intelectual (una comisión bajo la Liga de las Naciones) y organizada en parte por la ICSU. Allí, los cosmofísicos se encontraron con sus colegas más ortodoxos. Bohr, Von Neumann, De Broglie, Kramers, Klein y Brillouin proporcionaron informes sobre varios aspectos de la teoría cuántica, que se incluyeron en los anales de la conferencia en 1939, *Nuevas teorías en física*. El informe de Eddington sobre «Aplicaciones cosmológicas de la teoría de los cuantos» incluía derivaciones del radio del universo de Einstein (400 megaparsecs [Mpc]), el parámetro de Hubble (432 km s^{-1} Mpc^{-1}) y el número cósmico ($3{,}145 \times 10^{79}$), además de relaciones numéricas como $N/R^2 = 50\ m_p m_e c/3\ \hbar^2$. La presentación motivó objeciones por parte de Kramers, Von Neumann, Rosenfeld, Bohr y otros, ninguno de los cuales aceptaba el uso de la mecánica cuántica de Eddington. El informe de Milne sobre «Un posible modo de enfocar la dinámica nuclear», leído en su ausencia por Charles Darwin, no fue mejor aceptado. De acuerdo con Eddington, Milne argumentaba que «la relación de cualquier partícula [elemental] dada con el resto del universo no puede ignorarse en tales discusiones [sobre la interacción entre partículas]» (p. 207). Al contrario que Eddington, Milne simplemente ignoraba la mecánica cuántica en su discusión de la dinámica nuclear: «Incapaz de presentarme a mí mismo la mecánica ondulatoria, el espín electrónico, etcétera, debe intentar entender estos asuntos a mi manera; el resultado es una reconstrucción parcial, aunque satisfactoria en mi opinión, de ciertas porciones de la física sobre una base racional, una reconstrucción en la que cada ecuación es una proposición con contenido» (p. 219).

Si el heterodoxo sistema de Milne podía parecer el trabajo de un chiflado cuando se ve desde la perspectiva de la física cuántica, su reputación e impacto fueron muy diferentes en lo tocante a cosmología. De hecho, Milne fue probablemente el cosmólogo más influyente de los años treinta, y sus ideas fueron en gran parte las que establecieron la agenda para las discusiones sobre cosmología teórica. De 1932 a 1940, aparecieron más de 70 artículos relacionados de un modo u otro con la teoría de Milne, lo cual

significa que la teoría tenía una posición predominante en la época. Aunque Milne no estableciera una escuela de cosmofísica, varios de los más importantes teóricos de Inglaterra (y algunos en otros sitios) trabajaron en el área definida por las ideas de Milne. Entre estos estaban Gerald Whitrow, William McCrea, Arthur Walker y Georges McVittie, todos los cuales llevaron a cabo importantes trabajos en cosmología y estaban profundamente influidos por el sistema del mundo de Milne. Este sistema también fue de considerable importancia para la teoría posterior del estado estacionario, pero tras la guerra perdió fuelle rápidamente y, con la muerte de Milne en 1950, el interés en el sistema se agotó. La teoría de Milne de la física cósmica prosperó como parte de un clima intelectual global que era receptivo a este tipo de ideas, pero con el desplazamiento en el clima intelectual tras la guerra, la teoría empezó a parecer una curiosidad del pasado. Para Milne, su sistema del mundo no era sólo una teoría física, ni tampoco sólo una teoría filosófica: incluía tanto la física como la filosofía, además de la religión. Como los cosmólogos de las antiguas escuelas, creía que su sistema cosmológico, por sí solo, era capaz de probar la existencia del Dios y Creador cristiano.

Los aristotélicos modernos

En una breve nota de 1937, claramente inspirada por Eddington y Milne, Dirac sugirió una reconsideración de la cosmología basada en los grandes números adimensionales que pueden construirse a partir de las constantes fundamentales de la naturaleza. El postulado fundamental de Dirac era la hipótesis de los grandes números: que todos los grandes números adimensionales que se dan en la naturaleza están interconectados. Otorgó un significado particular a números de órdenes de magnitud 10^{39} y 10^{78} por la siguiente razón: con una unidad de tiempo dada por e^2/mc^3, la edad del universo, que tomó como dos mil millones de años, será aproximadamente 10^{39}, que es casi igual a la razón entre las fuerzas electrostáticas y gravitatorias entre un electrón y un protón, e^2/GmM. Es decir, $T/(e^2/\mathrm{cm}^3) \sim e^2/GmM$, siendo T el tiempo de Hubble (la inversa del parámetro de Hubble). Si el acuerdo numérico es significativo y las cargas y masas no cambian con el tiempo, que es lo que Dirac suponía, se sigue que la «constante» gravitacional decrece con el tiempo atómico según $G \sim t^{-1}$. Es decir, mientras que Milne sugería un incremento gradual, Dirac mantenía que la gravitación decrecería. Dirac estaba de acuerdo con Eddington en que las regularidades exhibidas por los grandes números adimensionales no eran puramente fortuitas, pero mientras que Eddington y la mayoría de los demás creían que las constantes eran independientes de la expansión cósmica (o del tiempo cósmico), Dirac las considerabas magnitudes contingentes, dependientes de la historia del universo.

Otra consecuencia de la hipótesis de los grandes números se derivaba de la constante $\rho(cT^3)/M$, donde ρ es la densidad media de materia y $cT = c/H$ es el radio del universo observable, el radio de Hubble. Dado que el valor de la constante (que proporciona el número de partículas en el universo) es del orden del número cósmico de Eddington 10^{78}, y que éste es el cuadrado del periodo en el tiempo atómico, Dirac con-

cluía que el número de partículas se incrementaría con el tiempo de acuerdo con la ley $N \sim t^2$. Ambas sugerencias (que la constante gravitatoria decreciera con el tiempo y la creación espontánea de materia) eran altamente heterodoxas y estaban en conflicto con la teoría general de la relatividad. En el año siguiente, 1938, Dirac decidió que la materia cósmica se conservaba después de todo. Afirmó que la conservación de la materia se podía reconciliar con la hipótesis de los grandes números y mantuvo la idea de una constante gravitatoria decreciente.

La aventura cosmofísica de Dirac tuvo poco impacto inmediato en la cosmología contemporánea. La mayoría de los astrónomos y físicos recibieron la heterodoxa teoría de Dirac con silencio, si no con vergüenza. Sin embargo, a la larga las especulaciones de Dirac resultaron ser más influyentes que la muy discutida teoría de Milne. El impacto de la teoría que perduró, como se vio mucho después, era la misma hipótesis de los grandes números, no la idea de una constante gravitatoria variable o el modelo universal que propuso en particular.

La idea general de una interconexión fundamental entre las combinaciones grandes de constantes naturales resultó ser una fuente de continua fascinación en la cosmología y astrofísica de posguerra. Uno de los pocos físicos que asumió la idea de Dirac en los años treinta fue Pascual Jordan, quien inmediatamente empezó a desarrollarla en una teoría más comprehensiva e intentó armonizarla con la teoría general de la relatividad. En la versión de Jordan, no sólo decrecía la constante gravitatoria con el tiempo, sino que también se creaba materia espontáneamente, aunque de un modo que no violaba la ley de conservación de la energía.

Las teorías de Eddington, Milne, Dirac, Jordan y otros no fueron recibidas favorablemente por aquellos científicos y filósofos que habían contemplado con creciente insatisfacción el auge de la cosmofísica racionalista. La mayoría de los físicos corrientes preferían ignorar la moda, pero en Inglaterra, su último bastión, encontró una abierta hostilidad y causó una especie de *Kulturkampf* a finales de los treinta. Helbert Dingle, un astrofísico y filósofo de la ciencia, protestó enérgicamente contra la nueva «pseudociencia de la cosmitología invertebrada» y lo que consideraba los desequilibrados métodos apriorísticos de los «modernos aristotélicos». Para Dingle, la aceptación de los métodos de Eddington, Milne y Dirac significarían el fin de la física empírica como se conocía desde los tiempos de Galileo. Según Dingle, el conocimiento experimental, no los principios apriorísticos, debería constituir la base de la física. Milne, por otro lado, mantenía que una explicación de la naturaleza completamente racional era tanto deseable como posible. En 1937, en respuesta a Dingle, formuló su opinión de esta manera: «El universo es racional. Con esto quiero decir que dada la mera afirmación de *lo que existe*, las leyes que se obedecen pueden deducirse mediante un proceso de inferencia. No habría entonces dos creaciones [una de la materia, la otra de la ley] sino una, y deberíamos quedarnos sólo con la suprema irracionalidad de la creación, parafraseando a Whitehead. Sólo podemos comprobar esta creencia mediante un acto de renuncia, explorando la posibilidad de deducir a partir de una supuesta descripción de qué son exactamente las leyes, que lo que existe obedece, evitando en lo posible todo

recurso a leyes determinadas empíricamente. Las leyes de la naturaleza no serían entonces más arbitrarias que los teoremas geométricos. La creación de Dios estaría sometida a leyes que no estarían posteriormente a disposición de Dios» (Kragh 1982a, p. 100).

El debate británico sobre la cosmofísica a finales de los treinta era una de esas raras ocasiones en la ciencia física moderna donde se discutía el propio fundamento de la física, incluyendo su influencia sobre asuntos sociales e ideológicos. Dingle estaba preocupado porque las ideas de los modernos aristotélicos crearan una atmósfera intelectual que fuera dañina no sólo a la ciencia, sino también al espíritu crítico y científico en un sentido más amplio. «¿Cuál será la disposición mental de un público al que se le enseña a medir el valor de una idea en términos de su incomprensibilidad y a burlarse de la vieja ciencia porque se podía entender?» se preguntaba. «Los tiempos no son tan prometedores como para que podamos descansar cómodamente en una atmósfera mental en la cual las ideas más aptas para la supervivencia no son las que se apoyan en la relación más racional con la experiencia, sino las que pueden desplegar la más impresionante panoplia de pseudoprofundidad. Existe suficiente evidencia en el continente de los efectos de las doctrinas derivadas "racionalmente y sin recurrir a la experiencia"» (Kragh 1982a, p. 102). Dingle pensaba probablemente en la situación en las dictaduras continentales, como la Alemania nazi y la Unión Soviética. La advertencia de Dingle fue repetida por John Bernal, el científico marxista. Sin referirse específicamente a Eddington y Milne, Bernal comentó en 1938, en su importante *La función social de la ciencia,* sobre el «misticismo y abandono del pensamiento racional» que había penetrado profundamente en la propia ciencia: «Las teorías científicas, en particular aquellas teorías metafísicas y místicas que tratan sobre el universo en su totalidad o sobre la naturaleza de la vida, que fueron expulsadas con escarnio en los siglos XVIII y XIX, están tratando de ganar su vuelta a la aceptación científica» (Bernal 1939, p. 3). A pesar de la validez de las advertencias de Dingle y Bernal, la moda en cosmofísica fue efímera y, de hecho, no llegó a amenazar a la física ordinaria basada en experimentos. En todo caso, los físicos británicos pronto tendrían otras cosas de qué preocuparse. Tras septiembre de 1939, se concentraron, con éxito, en la física con aplicaciones militares, un área que estaba a años luz de la cosmofísica racionalista e idealista. En su introducción a *Nuevas teorías en física,* el moderador del congreso en Varsovia lamentaba «la ausencia de muchos colegas alemanes, italianos y rusos, a los que las circunstancias le ha impedido asistir a pesar de sus sentimientos de fraternidad con los académicos de todo el mundo». Nos ocuparemos ahora de estas circunstancias.

CAPÍTULO 16

La física y las nuevas dictaduras

A la sombra de la esvástica

Con la ascensión al poder de Adolf Hitler como canciller del Reich el 30 de enero de 1933, se abría un nuevo y triste capítulo en la historia de Europa. Lise Meitner estaba entre los muchos que escucharon la retransmisión radiada de uno de los discursos de Hitler poco antes de que el partido nazi convirtiera Alemania en una dictadura. En una carta dirigida a Otto Hahn, describió el discurso como moderado, con tacto y personal y escribió que «ojalá continúen las cosas de esta manera [...] Todo depende ahora de la moderación racional» (Hentschel 1996, p. 18). Pero la moderación racional no fue lo que caracterizó los meses y años siguientes. Meitner misma tuvo que escapar de Alemania cinco años después. En un corto periodo de tiempo, los nuevos líderes dejaron claro que en Alemania había ocurrido una revolución y que la política e ideología del partido nazi debía seguirse estrictamente. Esto implicaba, entre otras cosas, que los otros partidos políticos quedaban prohibidos y que los judíos y los socialistas no podían ocupar plazas de funcionarios en el Reich. Según la Ley para restaurar el servicio civil de carrera del 7 de abril de 1933, un no ario se definía como una persona con un padre o abuelo no ario. Una persona así era Bethe, quien el 11 de abril de 1933 escribió a Sommerfeld, «probablemente no sepas que mi madre es judía. Por lo tanto, según la nueva Ley de servicio civil, soy de "ascendencia no aria" y por tanto no valgo para funcionario del Deutsches Reich [...] No tengo opción; debo actuar en consecuencia e intentar encontrar un lugar que me acomode en algún otro país» (Eckert y Schubert 1990, p. 83).

La primera oleada de despidos producida por la ley de abril de 1933 incluía a más de mil profesores de universidad, 313 de ellos titulares. Una medida tan drástica (y era sólo el principio) no pudo evitar dañar la ciencia y la academia alemanas, pero esto era de importancia menor para los líderes nazis, que ni entendían de ciencia ni mostraban interés por ella. En una ocasión, cuando Max Planck sugirió cautamente a Hitler que

la despedida de científicos judíos sería perjudicial para Alemania, el *Führer* (según una versión) montó en cólera y respondió: «Nuestra política nacional no será revocada o modificada, incluso para científicos. Si la despedida de científicos judíos significa la aniquilación de la ciencia alemana contemporánea, ¡entonces nos las apañaremos sin ciencia durante unos pocos años!» (Beyerchen 1977, p. 43). Una gran parte de la población alemana habría estado de acuerdo con el *Führer.* La despedida de científicos judíos encontró aquiescencia o indeferencia. Un científico estadounidense que visitó Alemania en 1933 informó en una carta: «A la mayoría de la gente no le importa un comino; una gran proporción está bastante feliz de que todo haya ocurrido. Los extremadamente pocos que están preocupados por ello no están inclinados a decir nada, ni en público, ni tan siquiera en privado» (Weiner 1969, p. 205).

Los físicos alemanes, como la mayoría de otros grupos, respondieron de distinto modo a la nueva situación. Unos pocos protestaron en público, pero una reacción mucho más común era expresar la preocupación con calma e intentar llegar a algún entendimiento con los nuevos líderes. Algunos físicos judíos dimitieron en protesta; la mayoría fueron despedidos. Buena parte de los físicos alemanes no judíos se sentían muy unidos a su país y no tenían deseos de dejarlo, ni como protesta ni por su propio bien. Planck, Laue y Heisenberg estaban entre los muchos que consideraban su deber quedarse, no sólo por el bien de la patria sino incluso más por el bien de la física alemana. Cuando Einstein dimitió públicamente de la Academia prusiana de las Ciencias en marzo de 1933, la academia, deseosa de apaciguar al gobierno, le acusó de «comportamiento agitador». Laue sugirió a Einstein que debería haber actuado de manera menos política, con más comedimiento. Pero Einstein, ya a salvo fuera de Alemania, no quería oír hablar de ello: «De la situación en Alemania puedes deducir exactamente a lo que conduce tal comedimiento. Significa dejar el liderazgo para los ciegos e irresponsables. ¿No hay detrás de esto una falta de sentido de la responsabilidad? ¿Dónde estaríamos ahora si gente como Giordano Bruno, Spinoza, Voltaire y Humboldt hubieran pensado y actuado de esta manera?» (Hentschel 1996, p. xliii). Por supuesto, también existían físicos que daban la bienvenida al nuevo régimen, ya porque creyeran en la causa nazi, o al menos simpatizaran con partes de ella, o porque vieran en las nuevas circunstancias una manera de mejorar sus propias carreras. Sólo unos pocos físicos eran miembros del partido nazi (DNSAP) antes de 1933, pero ser miembro de cualquier partido político había sido poco habitual entre los científicos y académicos del periodo de Weimar. Después de 1933, el número de miembros del partido nazi aumentó drásticamente, sobre todo entre científicos jóvenes. (Vale la pena recordar que los estudiantes estaban entre los más entusiastas partidarios de Hitler.) El Uranverein, el proyecto de energía atómica alemán, incluía 71 científicos, entre ellos la mayoría de los físicos nucleares alemanes. De los físicos, químicos e ingenieros involucrados en la obra del *Uranverein,* el 56 por 100 eran miembros del partido y, de éstos, el 8 por 100 habían sido miembros desde antes de 1933.

La infraestructura científico-política y el sistema de apoyo cambiaron después de 1933, pero muchas de las instituciones de la república de Weimar continuaron y, en general, no

estaban tremendamente politizadas. La más importante de las agencias de financiación a la investigación del periodo de Weimar, la Notgemeinschaft, continuó desempeñando un papel dominante, aunque bajo el nombre de Deutsche Forschungsgemeinschaft (Sociedad Alemana de Investigación) a partir de 1937. La Physikalisch-Technische Reichsanstalt era otra institución que no sólo continuó existiendo, sino que se expandió en gran medida. Después de que Paschen fuera obligado a dimitir en 1933, el cargo de director fue asumido por Johannes Stark, el físico nazi que también fue presidente (1934-1936) de la Notgemeinschaft. Stark reorganizó la Reichsanstalt y en 1938 aumentó su personal a 444, 138 de los cuales eran físicos. De acuerdo con su baja opinión de la física pura, la Reichsanstalt de Stark se concentró en la física técnica y militar antes que de la clase de física ordinaria que Paschen había intentado promover.

Para la Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, con Planck como presidente, la década después de 1933 fue un periodo de expansión. El Instituto de Física Kaiser Wilhelm, planeado en 1917 pero existente sólo sobre el papel durante el periodo de Weimar, se completó finalmente en 1937, financiado entre el gobierno y dos millones de marcos imperiales de la Fundación Rockefeller. El grande y bien equipado instituto, cuyo primer director fue Peter Debye, nacido en Holanda, pronto se convirtió en la principal institución de Alemania para la investigación física. En lo tocante a dinero e instituciones, los físicos alemanes no tenían motivo para no estar satisfechos con el nuevo régimen.

La física alemana sufrió severamente, tanto cuantitativa como cualitativamente, debido a la política de despidos del régimen. Una estimación fiable es que Alemania perdió el 25 por 100 de su comunidad física de 1932. El número total de físicos contratados por universidades cayó de 175 en 1931 a 157 en 1938, pero el declive se compensó aproximadamente por un incremento de físicos trabajando en institutos politécnicos. Así, a pesar de la fuerte pérdida por físicos emigrantes, la población física permaneció constante. Por otro lado, comparada con la situación en los Estados Unidos, donde el número de plazas de física continuaba creciendo, este estancamiento era una señal de enfermedad. De mayor importancia es que los físicos que abandonaban Alemania representaban una masa de talento, experiencia y originalidad que, simplemente, no podía reemplazarse. Tomemos el ejemplo de Gotinga, la cuna de la mecánica cuántica y una universidad con un elevado número de eminentes físicos y matemáticos judíos. Max Born, James Franck, Walter Heitler, Heinrich Kuhn, Lothar Nordheim, Eugene Rabinowich, Hertha Sponer y Edward Teller, todos fueron despedidos o forzados a que dejaran la universidad, lo que significaba que los institutos de física acabaron casi vacíos. Gotinga era excepcional, en todo caso; de hecho, sólo se despidieron profesores por motivos políticos en 15 de 36 universidades o politécnicos alemanes. Sin embargo, fueron las universidades con los institutos de física más grandes y progresistas, especialmente Berlín y Gotinga, las que más sufrieron. Los institutos politécnicos no sufrieron mucho y, en la universidad de Jena, conservadora y sin judíos en su personal de física, no se despidió a un solo físico. En general, cuanto más orientado a la teoría estaba el instituto, más despidos había: de 60 profesores de universidad en Alemania con plazas en física teórica, no menos de 26 acabaron en el exilio. La pérdida de talento

científico era notable. Entre los físicos forzados (o que se sintieron forzados) a dejar sus plazas en Alemania entre 1933 y 1940, seis eran premios Nobel (Einstein, Franck, Hertz, Schrödinger, Hess y Debye) y otros ocho recibirían el premio Nobel más adelante en Física o Química (Stern, Bloch, Born, Wigner, Bethe, Gabor, Hevesy y Herzberg). Para una lista más completa de emigrados, véase la tabla 17.2.

En junio de 1933, John von Neumann informó al matemático de Princeton Oswald Veblen sobre la situación en Alemania, que consideraba «muy deprimente». Explicaba, «hemos estado tres días en Gotinga y el resto en Berlín, y hemos tenido tiempo de ver y apreciar los efectos de la locura alemana actual. Es sencillamente horrible. En Gotinga, en primer lugar, es bastante obvio que si estos chicos siguen sólo dos años más (lo cual es por desgracia muy probable), arruinarán la ciencia alemana durante una generación, al menos» (Weimer 1969, p. 205). Según se fueron conociendo en otros países las realidades de las medidas del régimen nazi contra científicos judíos, muchos físicos extranjeros respondieron, al principio en silencio, evitando visitar Alemania, cancelando suscripciones a revistas alemanas o dándose de baja como miembros de asociaciones científicas alemanas. Esto, y las restricciones sobre alemanes para viajar en el extranjero, contribuyó a un creciente aislamiento internacional de la física alemana. Comenzando en 1936, a los científicos alemanes (junto con los rusos e italianos) se les prohibió participar en encuentros asociados con la Liga de las Naciones. En 1937 el régimen nazi prohibió que los alemanes aceptaran premios Nobel. Samuel Goudsmit fue más abierto que la mayoría de los otros físicos en su crítica de la política nazi: en una amarga carta de dimisión de 1936 a Walther Gerlach, daba sus razones para darse de baja como miembro de la Sociedad Alemana de Física: «Estoy decepcionado con que la Sociedad nunca haya protestado en su totalidad contra los duros ataques que algunos de sus extraordinarios miembros han sufrido. Además, pocas contribuciones a la física proceden de Alemania hoy en día; la principal exportación alemana es más bien la propaganda del odio» (Beyerchen 1977, p. 75). Varios físicos extranjeros siguieron a Goudsmit, lo cual contribuyó al declive en el número de miembros que la sociedad experimentó durante los años treinta. La Sociedad Alemana de Física había conseguido, de hecho, seguir un curso relativamente independiente, evitando la expulsión de sus miembros judíos. Fue sólo a finales de 1938 cuando Debye, como presidente de la sociedad, se sintió forzado a pedir a todos los miembros judíos que se dieran de baja como miembros. En 1940 Debye había tenido bastante, y abandonó Alemania para ocupar una plaza en la Universidad de Cornell.

La mayoría de los físicos extranjeros no estaban seguros de cómo actuar y tuvieron cuidado de no romper las conexiones con sus colegas alemanes. Estaban contra Hitler y la política nazi, no contra los alemanes mismos. El físico estadounidense, más adelante premio Nobel, Percy Bridgman era una excepción. A principio de 1939 publicó un manifiesto en *Science* en el que declaraba: «He decidido de ahora en adelante no mostrar mis aparatos ni discutir mis experimentos con los ciudadanos de Estados totalitarios». Se daba cuenta, por supuesto, que tal medida iba contra el ideal del internacionalismo científico, pero argumentaba que «la posibilidad de una concepción

idealista de la función actual de la ciencia ya ha sido destruida, y [...] quizá la única esperanza que la situación actual proporciona es hacer que los ciudadanos de los Estados totalitarios se den cuenta todo lo vívida y rápidamente posible de cómo impresiona y afecta al resto del mundo la filosofía de sus Estados» (Hentschel 1996, p. 185).

Los físicos y los administradores científicos alemanes eran muy conscientes de que Alemania ya no podía competir con los Estados Unidos en muchas áreas importantes de la física. También sabían, pero no podían decirlo abiertamente, que la política nazi de despidos era, en gran parte, responsable del declive. Carl Ramsauer era un reconocido físico aplicado y director de la división de investigación de AEG (Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft), una de las empresas industriales más grandes de Alemania. En un memorando a Bernhard Rust, secretario de ciencia, educación y cultura, Ramsauer avisaba de que la física alemana se estaba quedando claramente por detrás de la de Estados Unidos. Mientras que las citas estadounidenses en los volúmenes de 1913 a 1938 de *Annalen der Physik* habían subido del 3 al 15 por 100, Ramsauer halló que en el mismo periodo, las citas alemanas en *Physical Review* («la revista de física líder, según se considera internacionalmente») había decrecido del 30 al 16 por 100. En el área de física nuclear, Ramsauer halló que la investigación anglo-estadounidense dominaba: en 1927 el *Physikalische Berichte* listaba 47 artículos en física nuclear escritos en alemán y 35 en inglés; doce años después las cifras eran 166 en alemán y 471 en inglés. «El número de artículos alemanes sobre este campo tan moderno y prometedor se ha multiplicado por 3,5 en este periodo, mientras que el número de artículos escritos en inglés se ha multiplicado por 13,5. Sin embargo, como puede confirmar cualquier físico nuclear, la calidad de los artículos estadounidenses es, como poco, equivalente a la de los artículos alemanes».

Los historiadores posteriores han analizado datos similares a los de Ramsauer para proporcionar una imagen más detallada del efecto de la política nazi en la física. En lo concerniente a mecánica cuántica, incluyendo la electrodinámica cuántica, el 25 por 100 de todas las publicaciones en alemán entre 1926 y 1933 (las cuales suponían el 45 por 100 de todas las publicaciones) estaban escritas por físicos que más adelante abandonaron Alemania (tabla 16.1). Un patrón similar se observa en física nuclear, donde la tasa fue del 18 por 100. Además, los artículos de los futuros emigrantes tenían una valía por encima de la media, como indica la frecuencia con que se citaron en la literatura física. Los estudios sobre citas muestran que los artículos escritos por físicos nucleares alemanes emigrantes recibieron más de tres veces más citas que lo que cabría esperar a partir del número de sus artículos. En otros campos, las contribuciones de los futuros expatriados fue menos marcada, en general con una tasa mayor en los campos más teóricos y modernos y una relativamente menor en campos más experimentales y tradicionales, como acústica y mecánica técnica (tabla 16.2). En promedio, la contribución de los emigrantes a todos los campos de la física alemana fue del 10,8 por 100. La mayoría de sus publicaciones aparecían en el progresista *Zeitschrift für Physik,* de orientación teórica (donde compusieron un 14,5 por 100) y sólo unos pocos en el más conservador *Annalen der Physik* (5,9 por 100).

TABLA 16.1
Publicaciones de teoría cuántica

	Publicaciones		*Por posteriores emigrantes*	
Año	*Nº total*	*Porcentaje en alemán*	*Nº*	*Porcentaje en publicaciones alemanas*
1926	173	49,7	16	18,6
1927	319	50,8	42	25,9
1928	295	44,4	31	23,7
1929	286	43,4	28	22,6
1930	326	44,5	35	24,1
1931	208	50,5	33	31,4
1932	170	30,6	12	23,1
1933	153	38,6	20	33,9
total	**1.930**	**44,8**	**217**	**25,1**

Nota: Basado en datos de Fischer 1988.

TABLA 16.2
Publicaciones alemanas sobre física en campos seleccionados, 1925-1933

Campo de la física	*Publicaciones en alemán*	*Por emigrantes*	*Porcentaje*
Teoría cuántica	864	217	25,1
Nucleos, radiactividad, rayos de partículas	532	100	18,8
Espectros	958	123	12,7
Mecánica de fluidos y gases	1.740	163	9,4
Mecánica técnica	1.030	58	6,6
Acústica	482	18	3,8
Total, todos los campos	**23.216**	**2.505**	**10,8**

Nota: Basado en datos de Fischer 1988.

En general, las autoridades nazis no se oponían a la ciencia, y encauzaron enormes cantidades de dinero hacia la investigación científica. La física alemana entró en declive después de 1933, pero la investigación de alto nivel continuó tanto en campos experimentales como en teóricos. Heisenberg y su grupo en la Universidad de Leipzig todavía estaban entre los líderes mundiales en teoría cuántica de campos e investigación de rayos cósmicos; Von Weizsäcker realizó una importante labor en teoría nuclear y en astrofísica; en física del estado sólido, Robert Pohl, Walter Schottky y otros contribuyeron significativamente; y en física nuclear los trabajos de Meitner, Hahn y Strassmann condujeron a la fisión nuclear. Hasta en un ambiente cada vez más emponzoñado por la ideología nazi, era posible llevar a cabo investigación física del más alto nivel.

Física aria

En 1936 Philipp Lenard, profesor emérito de física, publicó un libro de texto en cuatro volúmenes, titulado *Deutsche Physik (Física alemana)*. En el prefacio, justificaba el inusual título: «'¿Física *alemana*?' se preguntará el lector. Podría también haber dicho física aria o física del tipo étnico nórdico, física de los que indagan la realidad, de los que buscan la verdad, la física de los que han fundado la investigación científica. '¡La ciencia es internacional, y siempre lo será!', querrá protestar. Pero esto está inevitablemente basado en una falacia. En realidad, como ocurre con todo lo que el hombre crea, la ciencia está determinada por la raza o la sangre... Las naciones de distintas mezclas raciales practican la ciencia de maneras distintas» (Hentschel 1996, p. 100). La física alemana o aria por la que Lenard abogaba en su trabajo tenía su origen en el principio de los años veinte, cuando Lenard y un grupo de otros físicos alemanes derechistas atacaron la teoría de la relatividad de Einstein y, en general, la física teórica moderna (véanse los capítulos 7 y 10). El punto de vista de que existían distintas formas de física, dependiendo de la raza y la nacionalidad, estaba en perfecto acuerdo con la ideología antiinternacionalista de los nacionalsocialistas, como se exponía en *Mein Kampf* de Hitler y en *Mythos des 20. Jahrhundert* de Alfred Rosenberg. El poco conexo grupo de antirrelativistas derechistas a principios de los veinte incluía a Lenard, Stark y Gehrcke como sus miembros más notables y, de ellos, los dos premios Nobel se inclinaron hacia el partido nazi en sus comienzos. Aunque Stark no se uniera al partido hasta 1930 y Lenard en 1937, ya estaban dedicados a la causa hitleriana desde hacía muchos años. En 1924 escribieron conjuntamente una alabanza a Hitler y sus aliados, a los que describieron como «los regalos de Dios, traídos de los días de antaño, cuando las razas eran más puras, las gentes más grandes y las mentes menos ofuscadas» (*ibid.*, p. 9). El artículo contribuyó a su ostracismo dentro de la comunidad física alemana, pero tras 1933 se hallaron en el lado ventajoso de la balanza y estaban dispuestos a tomarse la revancha. Mientras que el anciano Lenard, que se había retirado en 1931, actuaba sobre todo en el frente ideológico, el más joven Stark trabajaba políticamente e intentaba tomar las riendas de las organizaciones alemanas de física.

¿Qué era esta física alemana que Lenard, Stark y sus aliados quería instalar en lugar del vilipendiado dogma cuántico-relativista judío? Lo primero, nunca se formuló de una manera consistente o programática y nunca constituyó en realidad una cosmovisión coherente. Tampoco se materializó en ninguna práctica científica. Lo que caracterizaba la imagen física aria era más bien contra lo que estaba: la física moderna, con su complejo aparato matemático, la falta de visibilidad, resultados antiintuitivos y rechazo de la cosmovisión clásica de Newton, Faraday y Helmholtz. Básicamente, los físicos arios eran antimodernistas y romanticistas, que añoraban un retorno a la física basada en experimentos y a la teoría simple e inteligible, que estuviera de acuerdo con la intuición. Opuestos a la especialización que había fragmentado a la física, abogaban por una imagen holística de la naturaleza. Por aquel entonces, la física aria era por supuesto abiertamente racista, sosteniendo que toda la física sólida provenía de arios (aunque a veces la hubieran robado los judíos), mientras que la especialidad de los físicos de as-

cendencia judía era la teoría estéril, como la teoría de la relatividad. Lenard y sus compañeros creían que la física era la búsqueda de la verdad, y que la verdad podía obtenerse sólo mediante experimentos combinados con imágenes mentales de la realidad. La más importante de estas imágenes era el éter, que era, según muchos de los físicos arios, no una mera imagen, sino una realidad. De manera tan simplista como romántica, mantenía que el físico nórdico, y sólo él, podía establecer un diálogo con la naturaleza mediante cuidadosos experimentos y la observación; la naturaleza asumiría el diálogo y le proporcionaría las respuestas a las preguntas formuladas. La teoría avanzada, por otra parte, no llevaría a ningún lado. Como escribió un discípulo de Lenard, Alfons Bühl: «Este tratamiento de problemas físicos matemático en exceso ha surgido sin duda del espíritu judío [...] Igual que él [el judío] en otros ámbitos (como en los negocios) tiene siempre el cálculo numérico, el crédito y débito, ante sus ojos, así debe designarse una característica típicamente racial incluso en física el hecho de que ponga la formulación matemática en primer plano» (Beyerchen 1977, p. 132). Aunque esto pueda parecer terriblemente ingenuo, incluso ridículo, los físicos arios no eran locos sin conocimientos de ciencias: recibían apoyo de al menos un filósofo de la ciencia de cierta importancia, Hugo Dingler. Dado que los físicos arios quedaron excluidos de las revistas de física corrientes, como *Zeitschrift für Physik,* tenían que publicar sus contribuciones y polémicas en otro sitio. Una revista favorita era *Zeitschrift für die gesamte Naturwissenschaft*, una de las revistas más peculiares de la historia de las publicaciones físicas. Fundada en 1935, la revista era la tribuna oficiosa de los abogados de la física aria, e incluía una extraña mezcla de artículos ordinarios de física, propaganda antisemita, polémica contra la física establecida e historia hagiográfica de la ciencia.

La física aria podría también denominarse física nazi, y sus ideas recibieron un apoyo sustancial de funcionarios nazis como Rosenberg. Fue sólo gracias a su apoyo político como Stark pudo asegurarse una poderosa base en la física alemana y, por un periodo, hacer que la física aria pareciera una amenaza a la física convencional. Los seguidores dedicados de Lenard y Stark eran pocos, apenas más de treinta en número, pero dadas las circunstancias políticas y la mucha simpatía que recibían de sus estudiantes, su influencia era relativamente mayor que su pequeño número. Consiguieron un éxito temporal en 1939, cuando la polémica sobre la cátedra de Sommerfeld en Múnich se resolvió por fin. Sommerfeld quería que su sucesor fuera Heisenberg, pero los físicos arios lanzaron una venenosa campaña contra los dos teóricos cuánticos y acusaron a Heisenberg de ser un «judío blanco». Aunque Heisenberg fuera rehabilitado (gracias a la intervención personal de Himmler), la campaña logró su objetivo. Wilhelm Müller, un buen nazi y antirrelativista sin ningún conocimiento de física moderna, fue nombrado catedrático de física teórica en Múnich. Podía haber sido una broma, si no hubiera sido real y con un trasfondo trágico. A finales de 1939, seis seguidores de la física aria habían sido nombrados catedráticos en universidades o politécnicas (en Múnich, Heidelberg, Karlsruhe y Stuttgart).

A pesar de victorias ocasionales, la influencia de los vociferantes físicos arios fue limitada y efímera. La gran mayoría de los físicos alemanes, incluso los que simpatiza-

ban con la causa nazi, consideraban las ideas de Lenard y Stark inaceptables, ridículas y peligrosas. Jordan, que estaba a favor del régimen e ingresó en el partido nazi en 1933, no quería tener nada que ver con el extraño intento de cancelar el progreso en física teórica logrado durante dos décadas. La física aria era simplemente incapaz de reemplazar la física de Einstein, Bohr y Heisenberg, y en la práctica la enseñanza de física en muchas universidades alemanas no se vio afectada por el intento de prohibir la teoría de la relatividad. La teoría se enseñaba en libros de texto y clases, pero el nombre de Einstein se omitía muchas veces. La física aria nunca llegó a asumir el nivel de poder que el lisenkoísmo obtuvo en la Rusia de Stalin. Después de 1940, cuando Stark y sus seguidores perdieron gran parte de su apoyo político, el movimiento empezó a desintegrarse y tres años después, había prácticamente dejado de existir. Quizá el principal efecto del movimiento de física aria fue el impacto en físicos ordinarios como Heisenberg,Von Weizsäcker y Laue. Estaban convencidos de que Stark y sus camaradas acabarían destruyendo la física alemana y que era imperativo combatir el mal, lo cual sólo podía hacerse desde el campo alemán. Fue una razón que contribuyó a su estancia en Alemania y a su cooperación con las autoridades nazis. No eran plenamente conscientes de que estaban sucediendo cosas peores en el Tercer Reich que las actividades de un grupúsculo de físicos arios relativamente inocuo.

La física en la Italia de Mussolini

Mussolini llegó al poder en 1922; tres años después Italia se convirtió en una dictadura fascista bajo *Il Duce.* Por aquel entonces, la física italiana tenía poco de qué presumir. No existía nadie capaz de reemplazar a la generación anterior de experimentalistas de gran reputación, como Augusto Righi, y en la teoría la situación era incluso peor. un país Otrora tan importante en la física, Italia parecía encaminada a convertirse en un enclave provinciano. Pero entonces las cosas cambiaron. Durante el periodo de 1925-1938, los años del fascismo, la física italiana floreció de una manera muy notable, y el país pasó a ser una de las naciones más avanzadas de Europa en física moderna. La figura central en este proceso fue sin duda Fermi, que fue nombrado catedrático de física teórica en Roma en 1926, cuando tenía sólo veinticinco años. A principio de los años treinta, Fermi organizó su grupo de jóvenes físicos experimentales y teóricos, que incluía a Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Bruno Pontecorvo, Emilio Segré y otros. Fermi y su grupo cambiaron la escena de la física italiana, y de hecho de la física mundial, pero no estaban solos. Al mismo tiempo que Fermi se concentraba en la física nuclear en Roma, un fuerte grupo de jóvenes físicos en Florencia realizaba importantes contribuciones al estudio de los rayos cósmicos y áreas relacionadas. Las principales figuras en el grupo de Florencia eran Bruno Rossi, Gilberto Bernardini, Giuseppe Occhialini y Giulio Racah, todos los cuales disfrutaban de estrechas relaciones con sus colegas de Roma. Los físicos italianos tenían miras y prácticas fuertemente internacionales y a menudo pasaban temporadas en el extranjero. La física moderna que representaban parece no haber causado ningún problema con el gobierno, ni controversias con los filósofos de inclinación fascista.

Fermi y la mayoría de sus colegas estaban inmersos en la física y no muy interesados en política. Sin embargo, aunque Fermi era básicamente apolítico, sabía manejarse bien en los círculos políticos de la ciencia romana, un área en la que encontró un poderoso «padrino» en el físico y político Orso Maria Corbino. En 1929 Fermi fue nombrado el único físico miembro de la recién creada Accademia d'Italia, una institución establecida por Mussolini como alternativa a la antigua y distinguida Accademia dei Lincei, los miembros de la cual era hostiles al fascismo a los ojos de Mussolini. Como miembro de la Accademia d'Italia, Fermi tenía la potestad de vestir el uniforme fascista de la academia y recibió el título de «excelencia». También era miembro del Consejo Nacional de Investigación italiano. Le gustara o no, Fermi era parte de la política italiana y su grupo de investigación en Roma estaba en realidad protegido por el estado fascista. Fermi nunca apoyó activamente el estado de Mussolini, pero tampoco fue antifascista.

A pesar de las similitudes ideológicas entre el fascismo italiano y el nacionalsocialismo, la conversión de Alemania en Tercer Reich no fue bienvenida por Mussolini. Muchos físicos italianos decidieron que la colaboración con una nación que despedía a los colegas judíos debería enfriarse. Éste era el trasfondo de la decisión de Fermi de publicar los importantes artículos sobre reacciones nucleares inducidas por neutrones en inglés y no, como habría sido natural en otras circunstancias, en alemán. En general, los físicos en Roma y Florencia se dirigieron hacia Inglaterra y Estados Unidos y dieron la espalda a Alemania. Durante un tiempo, la física en Italia continuó floreciendo, imperturbada por la grave situación en Alemania. A partir de 1937, sin embargo, la Italia de Mussolini y la Alemania de Hitler se acercaron progresivamente, con Alemania en el papel de socio principal en la alianza política, militar y económica. Como resultado, en el verano de 1938 el gobierno fascista introdujo leyes raciales diseñadas siguiendo las famosas leyes de Nuremberg alemanas. Una de las consecuencias fue que los académicos y científicos judíos fueron despedidos de las universidades italianas y que, en general, la vida se complicó para los judíos italianos. Fermi resultó afectado principalmente porque su mujer era judía, pero también porque extremistas fascistas le acusaron públicamente de «haber transformado el instituto de física en una sinagoga» (Segré 1970, p. 78). Decidió abandonar el país y pronto encontró una oportunidad en la recepción del premio Nobel el 10 de diciembre de 1938. En vez de regresar a Roma desde Estocolmo, él y su familia fueron a Estados Unidos. Varios físicos italianos abandonaron el país, incluyendo Rasetti, Amaldi y Segré. Rossi, que era judío, afrontó la misma situación que Bethe en Alemania cinco años antes. Consiguió obtener un pasaporte e ir a Copenhague, donde Bohr le ayudó económicamente y le encontró un trabajo temporal. Blackett lo invitó a Manchester con una beca de la Society for the Protection of Science and Learning y en junio de 1938 Rossi, siguiendo los pasos de Fermi, llegó a Chicago.

Física, materialismo dialéctico y estalinismo

Entre las debilidades políticas de la física aria (además de intentos relacionados en matemáticas, química y biología) estaba que no resultaba atractiva para una base teórica

filosófica aceptada del nacionalsocialismo. Tal base teórica, simplemente, no existía. El nacionalsocialismo se construía con acciones y emociones, no sobre un sistema coherente de ideas. Esto era lo contrario de la situación en la Unión Soviética, donde el régimen se basaba ideológicamente en el corpus socialista de los escritos de Marx, Engels y Lenin. Desde los primeros días de la nueva Unión Soviética, los filósofos consideraron importante analizar la ciencia desde el punto de vista de la filosofía marxista oficial, es decir, el materialismo dialéctico que se podía destilar de las obras de Engels y Lenin. Los entusiastas del marxismo intentaban promover una «ciencia proletaria» que diferiría de la ciencia burguesa en cuanto a métodos, objetivos y enfoque. El movimiento atrajo considerable interés político y filosófico, pero no consiguió convencer a los físicos de que debían cambiar la ciencia en una dirección más proletaria. En general, había pocos activistas políticos entre los científicos soviéticos. Según un estudio de 1930, la Unión Soviética incluía unos 25.000 «trabajadores científicos», entre los cuales había unos 1.000 físicos. Sólo 44 de los físicos eran miembros del Partido Comunista.

Durante la mayor parte de los años veinte no hubo ningún conflicto serio entre filósofos del partido y físicos, pero en los años treinta el debate se agudizó, especialmente en conexión con la intepretación de la mecánica cuántica. No era tanto un intento por parte del régimen de imponer su idea sobre los físicos como un conflicto entre físicos y filósofos, entre los propios filósofos y, en algunos casos, entre los mismos físicos. Dado que muchos filósofos se consideraban los guardianes intelectuales del verdadero marxismo-leninismo, sus voces eran políticamente más importantes de lo que hubieran sido bajo circunstancias normales y democráticas. Si se podía sostener que cierta teoría física, o cierta interpretación de ella, era «idealista», «subjetiva» o «machiana» (relacionada con las ideas de Ernst Mach), se podía llegar a una situación potencialmente peligrosa. Por ejemplo, el filósofo Alexander Maksimov afirmó en 1939 que Einstein, Schrödinger, Bohr, Dirac y Heisenberg eran todos «idealistas de la variedad machiana» y que sus puntos de vista sobre la física cuántica eran ideológicamente inaceptables. «La lucha por el bolchevismo en la ciencia es la lucha por una reconstrucción fundamental de la ciencia», declaró (Vucinich 1980, p. 240). Los filósofos del partido intentaron entablar discusiones ideológicas con los físicos y convencerles de sus errores, pero no tuvieron mucho éxito. Muchos físicos simplemente ignoraron a los filósofos y permanecieron alejados de las cuestiones sobre la relación entre física y marxismo. Asumir tales cuestiones podría conducir a dificultades y, después de todo, la física era mucho más interesante que la filosofía. Otros asumieron el reto y argumentaron, razonablemente, que para criticar la física uno debe entenderla; no como los filósofos, comentaban jubilosamente. O argumentaban que no existía, de hecho, ninguna contradicción entre el dogma marxista-leninista y la interpretación de la relatividad y la física cuántica. Abram Ioffe protestó en 1934 que era totalmente infundado etiquetar a Bohr y a otros partidarios de la interpretación de Copenhague como «idealistas». Muy al contrario, sostuvo que los sorprendentes hallazgos logrados por los físicos occidentales suponían «una brillante confirmación y enriquecimiento del materialismo dialéctico» (*ibid.*, p. 242).

La controversia no estaba simplemente entre fanáticos filósofos del partido y físicos razonables. Había físicos soviéticos cuyos punto de vista científicos no eran más modernos que los de, por ejemplo, Lenard en Alemania. Se adherían a una cosmovisión newtoniana, apoyaban la existencia del éter y rechazaban las teorías de la relatividad y de la mecánica cuántica. Entre la minoría más conservadora estaban Kliment Timiriazev, catedrático de física en la Universidad Estatal de Moscú, y Vladimir Mitkevich, especialista en tecnología eléctrica. Estos y otros «mecanicistas» acusaron a los físicos progresistas como Frenkel, Vavilov, Tamm y Ioffe, de promover el idealismo, el oscurantismo y el clericalismo. Como en Alemania, los ataques a la «nueva física» incluían aspectos de antisemitismo. Otro aspecto de la disputa era regional, con Leningrado desempeñando un papel similar al de Berlín en el caso alemán. Leningrado era un bastión de los teóricos cuánticos y relativistas, y el Instituto Físico-Técnico de Leningrado tenía una reputación tan mala entre los comunistas de la línea dura como buena en física internacional. Ésta fue una de las razones que causaron un declive de la importancia de Leningrado como centro de la física soviética. A mediados de los años treinta, la Academia de la Ciencias se transfirió de Leningrado a Moscú, y muchas instituciones físicas empezaron a concentrarse en la capital.

Aunque algunos filósofos y físicos atacaron las teorías físicas propiamente dichas, la mayoría de la discusión en los años treinta se refería a cuestiones metodológicas y epistemológicas. Existía un amplio (pero no total) acuerdo sobre lo básicamente correctas que eran las teorías de la relatividad y de la mecánica cuántica, y los intentos de crear una comunidad científica de física proletaria fueron débiles y no se tomaron muy en serio. Sin embargo, las cuestiones de interpretación y método eran delicadas políticamente y no podían restringirse al nivel puramente académico. Muchos físicos soviéticos prominentes se adhirieron a los puntos de vista de la escuela de Copenhague y discutieron (de hecho, tuvieron que discutir) cómo estos puntos de vista podían ponerse en completa armonía con el materialismo dialéctico. Este grupo de físicos incluía teóricos eminentes como Fock, Landau, Tamm, Frenkel y Bronstein. Una minoría de físicos y una mayoría de filósofos estaba en violento desacuerdo. K.V. Nikol'skii, físico, atacó la postura de Bohr-Heisenberg, que consideraba «totalmente incompatible con las ideas progresistas en física teórica, ya que es una consistente elaboración de principios idealistas o machianos» (Vucinich 1980, p. 245). En algunas de las agresivas discusiones de finales de los años treinta, denominar a un físico «idealista» resultaba desagradablemente próximo al etiquetado de sus enemigos como «judíos blancos» por parte de los físicos arios. De hecho, Ioffe comentó sarcásticamente que la postura de Maksimov, que incluía lacerantes ataques a Einstein y Bohr, tenía una similitud con la de Lenard y Stark más que superficial. Yakov Frenkel hizo explícito este argumento; el distinguido teórico no tenía respeto hacia el materialismo dialéctico y los supuestamente profundos conocimientos de física de Engels y Lenin. En una carta de 1937 a *Bajo la bandera del marxismo,* la revista teórica del partido, resaltaba que el grupo de Maksimov «en virtud de sus posturas, es sorprendentemente similar al grupo de físicos reaccionarios encabezados por el profesor Stark [...] En su tratamiento de la física mo-

derna, Mitkevich, Timiriazev, Kasterin y, junto a ellos, Maksimov, difieren de Stark, Leonard [*sic*], Herke [¿Gerhcke?] y otros representantes del oscurantismo alemán sólo en que reemplazan el término «judío» con el término «idealista»» (Frenkel 1997, p. 215). La carta de Frenkel no fue publicada.

Como en Alemania, la bien establecida teoría de la relatividad se convirtió en un objetivo de la crítica con motivación política de algunos filósofos. Se sintieron provocados por el intento de Einstein de geometrizar la física y su énfasis en el papel del pensamiento puro a la hora de establecer una teoría física. «La teoría de la relatividad no penetra en la profundidad de los fenómenos físicos», escribió Ernst Kol'man en 1939. «Todos los esfuerzos de construir la física sobre la geometría del espacio continuo están condenados al fracaso [...] Estos esfuerzos están anclados en la exageración metafísica sin fundamento, reforzada por el idealismo de muchos físicos teóricos» (Vucinich 1980, p. 249). La mayoría de los críticos soviéticos eran más abiertos y mas avanzados que sus equivalentes en Alemania, que negaban totalmente la validez de la teoría de la relatividad y rara vez distinguían entre la teoría especial y la general. En general, la disputa en los años treinta entre filósofos y físicos era de diferente naturaleza de la que tenía lugar en Alemania. Los físicos y los filósofos ilustrados no tenían problemas a la hora de abogar por sus ideas en oposición a los ataques de los filósofos del partido, y no se planteaba la creación de una física específicamente marxista como contrapartida de la física aria. El principal motivo por el que el debate ocurría de una manera relativamente libre, sin serias restricciones ideológicas, era que se trata de un debate entre dos grupos de académicos, y ninguno de los dos puntos de vista estaba sancionado por las autoridades políticas. Esta situación cambió tras la Segunda Guerra Mundial, cuando la vida intelectual soviética experimentó un clima ideológico mucho más duro y cuando la interpretación de la mecánica cuántica pasó a formar parte del juego político-ideológico. Entre 1948 y 1951, la física se politizó fuertemente, incluyendo una campaña contra el «einsteinianismo reaccionario», pero incluso entonces era ante todo una cuestión sobre cuál era la filosofía adecuada para la física. El horrible caso del lisenkoísmo no se repitió en la física soviética.

Esto no significa que la comunidad física soviética viviera pacíficamente con el régimen de Stalin. A partir de 1933, aproximadamente, el clima en la Unión Soviética se caracterizó por un malsano cóctel de xenofobia, sospecha, adulación y miedo a la policía secreta. Mientras que los físicos soviéticos habían sido anteriormente activos participantes en la comunidad física internacional y principales contribuyentes a las revistas de física alemanas, ahora se veían cada vez más forzados al aislamiento. Como una salida para los físicos soviéticos, pero también con contribuciones ocasionales de extranjeros, se fundó en 1932 *Physikalische Zeitschrift der Sowietunion*. Incluía una extraña mezcla de física técnica y militar, filosofía de la ciencia políticamente correcta y artículos técnicos de alta calidad sobre teoría cuántica de campos y otros campos de la física ordinaria.

Las víctimas de Stalin provenían de todas partes, e incluyeron físicos. El déspota ruso no estaba más interesado por la física que Hitler, y nadie, científico o no, podía

sentirse seguro bajo el Gran Terror. Entre 1935 y 1941, murieron millones de ciudadanos soviéticos. Hasta 18 millones puede que hayan sido arrestados, y posiblemente la mitad de ese número fueron ejecutados o desaparecieron. Los historiadores han estimado que más de cien físicos fueron arrestados en las purgas de 1937-1938 tan sólo en la zona de Leningrado. Esto indica que sobre el 20 por 100 de todos los físicos soviéticos podrían haber sido arrestados. Algunos físicos, como Gamow en 1933, escaparon al Oeste. Otros fueron arrestados por la policía secreta, incluyendo a Landau, que pasó un año en la cárcel hasta que ser liberado por presiones de Peter Kapitza. El físico austriaco Fritz Houtermans trabajaba en el Instituto Físico-Técnico de Kharkov. Sus convicciones comunistas no impidieron que fuera arrestado, y tuvo que pasar dos años en prisión hasta que ser extraditado a Alemania en 1939. Lo mismo le sucedió al colega de Houtermans Alexander, Weissberg, otro físico austriaco y convencido comunista. Viktor Bursian, teórico de Leningrado y especialista en mecánica cuántica, fue arrestado en 1936 y murió en prisión diez años después. Matvei Bronstein, un teórico ruso judío de treinta y dos años, no tuvo mejor suerte. Fue arrestado en 1937 y acusado falsamente no sólo de ser un espía extranjero, sino también de «oponerse resueltamente a la aplicación del materialismo dialéctico a la ciencia natural» (Gorelik y Frenkel 1994, p. 145). Su vida terminó ante el pelotón de fusilamiento. El mismo destino trágico esperaba a Lev Rosenkevich y Lev Schubnikov, dos de los colegas de Landau. Otros físicos soviéticos ejecutados o muertos en prisión incluían a Vsevelod Frederiks, un especialista en teoría de la relatividad, y B. Gerasimovich, un astrofísico. Las purgas fueron de mayor importancia incluso para la astronomía y la astrofísica soviéticas que para la física propiamente dicha. En el famoso observatorio Pulkovo a las afueras de Moscú, diez astrofísicos titulares fueron arrestados por su «participación en una organización terrorista, fascista y trotskista» (Josephson 1991, p. 316).

Mientras que los nazis expulsaron a los físicos no deseados, los comunistas los fusilaron, encarcelaron o hicieron lo posible para mantenerlos dentro de las fronteras de la Unión Soviética. No se les permitía viajar al exterior y asistir a conferencias científicas. En el caso de Peter Kapitza, el especialista ruso en magnetismo y física de bajas temperaturas que había pasado varios años con Rutherford en Cambridge, las autoridades soviéticas llegaron incluso hasta el extremo de prácticamente secuestrarlo. En una visita de Kapitza, que por entonces vivía en Cambridge, a Rusia en 1934, no se le permitió abandonar el país. Se le suministró una amplia financiación para que creara un nuevo instituto físico y pronto se convirtió en uno de los físicos con más influencia de la Unión Soviética. Como Heisenberg en Alemania, Kapitza aprendió rápidamente a llegar a compromisos con fuerzas políticas inmorales. La situación en la Unión Soviética en 1937 puede estimarse a partir de una carta que Kapitza escribió a un funcionario del partido de alta categoría en protesta por la detención de Vladimir Fock: «Me turbó mucho la noticia de que el físico V. A. Fock fuera arrestado ayer [...] Ello distanciará nuestros círculos científicos soviéticos todavía más de la construcción del socialismo y puede, además, minar la habilidad de Fock de trabajar y, con ello, provocar una mala reacción de los científicos aquí y en el Oeste. Se dice que, además de Fock,

muchos otros teóricos fueron arrestados hace algunos meses en conexión con el mismo asunto. De hecho, han sido arrestado tantos que en la facultad universitaria de matemáticas y física no puede encontrarse a nadie que dé clase a los estudiantes» (Boag *et al.* 1990, p. 337). Fock fue liberado poco después.

CAPÍTULO 17

Fuga y ganancia de cerebros

La física estadounidense en los años treinta

A partir de finales de los años veinte, la física en los Estados Unidos experimentó un rápido crecimiento, tanto cuantitativo como cualitativo. Se establecieron nuevos institutos, departamentos y programas de licenciatura, a menudo con el apoyo económico de grandes fundaciones privadas. La más importante de éstas era el General Education Board, una obra filantrópica creada por la Fundación Rockefeller, cuyas operaciones estaban restringidas a los Estados Unidos. Entre 1925 y 1932, el General Education Board apoyó departamentos de ciencia en las principales universidades de Estados Unidos con la enorme cifra de 19 millones de dólares.

El dinero fue una importante razón del progreso estadounidense, pero no la única. Otra era la devoción de los líderes estadounidenses en física (y otras ciencias) por la cooperación y competición internacionales. Esto había tenido lugar tradicionalmente con el envío de científicos de Estados Unidos a Europa, pero en los años veinte la corriente empezó a invertir su dirección, primero con la invitación a varios físicos europeos a que ocuparan plazas en universidades estadounidenses y con la creación de seminarios y escuelas de verano del más alto nivel. La escuela de verano anual de la Universidad de Michigan, que comenzó en 1927, era la más importante de éstas, pero era sólo una de las varias instituciones que atraía a los visitantes de Europa. En varias universidades estadounidenses se estaban desarrollando potentes programas de física; Princeton, Chicago, la Universidad de California en Berkeley y el Instituto de Tecnología de California (Caltech) estaban entre los más importantes.

El creciente atractivo de los centros de física estadounidenses queda ilustrado por la elección de las instituciones de los becarios posdoctorales de la Fundación Rockefeller o del International Education Board (IEB). El IEB operaba en Europa como contraparte del General Education Board; como esta institución, se financiaba con dinero de la Rockefeller. De los 135 físicos europeos que recibieron becas posdoctorales para

estudios en el extranjero entre 1924 y 1930, 44 escogieron ir a los Estados Unidos. Las naciones europeas más atractivas eran Alemania e Inglaterra, con 26 y 25 becarios de física, respectivamente; 16 escogieron ir a Dinamarca, una elección que reflejaba la importancia del instituto de Bohr. A principios de los años treinta, la física estadounidense ya había progresado de modo impresionante y era competitiva con cualquiera europea. Cuando la American Physical Society celebró su encuentro anual en Chicago en 1933, cinco meses después de que Hitler llegara al poder en Alemania, John Slater participó junto con notables físicos europeos como Bohr, Cockcroft y Fermi. Slater recordaba que lo que más le había impresionado era «no tanto la excelencia de los ponentes invitados como el hecho de que los trabajadores estadounidenses del programa proporcionaran charlas de tan alta calidad de investigación y de tal importancia que, por primera vez, los físicos europeos presentes estaban aquí para aprender tanto como para instruir» (Weimer 1969, p. 201).

En la época del encuentro de Chicago, la física estadounidense estaba, de hecho, enfrentándose a grandes problemas debidos a los efectos de la Gran Depresión. La crisis económica azotó a la ciencia estadounidense con toda su fuerza sólo que tras un retraso de varios años; los efectos no perduraron, pero cuando la depresión llegó en 1933, el impacto fue serio. La financiación fue drásticamente reducida, el salario del personal académico se redujo y para los nuevos doctores fue casi imposible obtener plazas. Sin embargo, a pesar de los problemas, el año de la crisis no resultó en un número menor de estudiantes de doctorado. En 1931, el último buen año, las fundaciones estadounidenses donaron un total de 5 millones de dólares a la investigación en las ciencias naturales; en 1934 el dinero de las fundaciones se había reducido a dos millones. Todas las instituciones de física se vieron afectadas, de manera más brutal quizá en el caso del Instituto Nacional de Estándares. Entre 1932 y 1934, el presupuesto operativo para esta institución, que era la gubernamental que más físicos empleaba, fue reducido nada menos que en un 70 por 100. Tampoco se libraron los laboratorios industriales. En 1933, General Electric había despedido al 50 por 100 de su personal de laboratorio, y AT&T casi al 40 por 100. Además de los problemas financieros, muchos cabecillas de la física estadounidense estaban preocupados por la imagen pública de la ciencia, que mostraba indicios de cambiar de la imagen positiva tradicional a una actitud mucho más crítica, e incluso negativa. A principio de los años treinta, existía una especie de movimiento anticiencia no organizado en la sociedad estadounidense que cuestionaba los propios cimientos de la labor científica. Como otros movimientos anteriores y posteriores de este tipo, era heterogéneo y se nutría de distintas (y a veces incompatibles) fuentes de insatisfacción.

Algunos humanistas deploraban la ausencia de valores en la ciencia y sostenían que la ciencia no podía proporcionar lo que el hombre moderno más necesitaba: esperanza espiritual y guía moral. Por lo tanto, sugerían una moratoria en la investigación científica, o un sector científico fuertemente reducido. La actitud no era nueva, ni estaba restringida al entorno estadounidense. En 1927 el obispo de Ripon dio un sermón en el encuentro de la Asociación Británica, en el cual sugirió, «a riesgo de que me lin-

chen algunos de mis oyentes, la suma de la felicidad humana exterior a los círculos científicos no se reduciría necesariamente si durante diez años todos los laboratorios de física y química se cerraran y la paciente y fructífera energía de éstos se transfiriera a recobrar el arte perdido de la coexistencia común y a encontrar la fórmula de atar cabos en la escala de la vida humana» (Bernal 1939, p. 2). Otros críticos creían que la ciencia y la tecnología eran las culpables del desempleo masivo, ya que ¿no destruían las máquinas y fábricas automatizadas más trabajos de los que creaban? Y ¿no eran las tecnologías que ahorraban trabajo producto de la ciencia? Los críticos sostenían también que el fallo de la ciencia no era que produjera innovaciones tecnológicas, sino que no producían las suficientes ni del tipo de las que beneficiaban al ciudadano ordinario. En vez de utilizar el dinero en asuntos esotéricos e inútiles (como la teoría de la relatividad), se les aconsejaba a los físicos que resolvieran las necesidades básicas de la gente. Como un crítico lo expresó: «Con una pequeña parte de los cerebros que ahora están dedicados a la velocidad con la que el neutrón penetra el núcleo del átomo [...] el coste de la vivienda de la gente pobre se reduciría a la mitad» (Kevles 1987, p. 247). Este tipo de crítica compartía elementos con la que planteaba el movimiento por la «ciencia proletaria» en la Unión Soviética.

La actitud anticientífica probablemente no estaba muy extendida, pero los líderes de la comunidad científica se la tomaron en serio, temiendo que dañara las expectativas de progresos adicionales cuando pasaran los efectos de la depresión. Aunque los grandes filántropos estaban lejos de ser anticientíficos, estaban influidos por la demanda general de una ciencia más humanista y orientada al bien común. Éste fue un motivo principal en la decisión de la Fundación Rockefeller de cambiar sus áreas de prioridad de las ciencias físicas y químicas, más básicas, a las ciencias que trataban directamente del hombre, como la biología, la psicología y las ciencias sociales. «La inquietud e incluso la alarma están brotando según gana terreno la creencia de que las contribuciones de las ciencias físicas han despojado al hombre de la capacidad de absorberlas», escribió el presidente de la Fundación Rockefeller en 1936. «No puede haber muchas dudas de que se ha creado un serio desfase entre nuestro rápido avance científico y nuestra estática evolución ética» (Kevles 1987, p. 249). El desplazamiento en la política de la Rockefeller era un asunto serio para los físicos, tanto en América como en Europa. Millikan en Caltech y Bohr en Copenhague, por mencionar sólo dos ejemplos, se dieron cuenta de que podrían conseguir financiación para sus proyectos físicos sólo si eran relevantes para problemas biológicos. En consecuencia, sostuvieron que éste era el caso, aunque en verdad, sus investigaciones sobre rayos cósmicos y reacciones nucleares fueran pura física.

Aun así, en 1935 Edwin Kemble de la Universidad de Harvard describió la situación laboral para los recién doctorados de física como una «pesadilla», pero por aquel entonces las cosas empezaban a mejorar. Los efectos de la Gran Depresión ya no se sentían seriamente en la ciencia estadounidense y se instauró rápidamente un periodo de recuperación. La situación de empleo para los físicos mejoró y el número de estudiantes de física aumentó de manera importante. Durante 1931-1940, se

otorgaron más de 1.400 doctorados de física, el doble que en la década anterior. En 1940, casi 200 licenciados recibieron grados de doctor en física en universidades de Estados Unidos (véase gráfico 2.1). El número de miembros de la American Physical Society creció linealmente, de unos 1.300 en 1920 a unos 3.700 veinte años después. En 1941 el número de físicos que trabajaban en Estados Unidos alcanzó los 4.600: casi cinco veces el número de físicos de la Unión Soviética. El número de laboratorios de investigación industrial creció de 300 en 1920 a más de 2.200 en 1940. En una perspectiva más amplia, los años de la depresión fueron una ruptura menor de una tendencia general de crecimiento en la física estadounidense. Este crecimiento y el vigor general de la física de Estados Unidos constituyeron un factor esencial en la habilidad del país en absorber los muchos físicos europeos que se refugiaron en los años treinta.

Muchos de los físicos empleados en la industria, en un número estimado en unos 1.800 a finales de los treinta, se sentían cada vez más fuera de la cultura de la física académica y decidieron no ingresar en la American Physical Society. La mecánica cuántica no sólo dio fuerzas a la teoría con respecto a la experimentación, sino que alienó a buena parte de la comunidad física. El potencial cisma se evitó mediante la fundación en 1931 del American Institute of Physics, una especie de organización paraguas que se ocupaba de la física tanto aplicada como pura. *Physical Review* siguió siendo el es-

TABLA 17.1
Distribución de artículos, según las fuentes, en las principales revistas académicas de física en los Estados Unidos y en Gran Bretaña

		Fuente, porcentaje		
	Nº de artículos	*Académicos*	*Industriales*	*Gubernamentales*
Estados Unidos (*Physical Review*)				
1930	311	88,7	7,7	3,5
1935	282	96,5	3,2	0,4
1940	290	93,4	5,5	1,0
Gran Bretaña (*Philosophical Magazine* y *Proceedings of the Royal Society of London*, combinados)				
1932	338	92,9	0,9	6,2
1936	301	93,7	2,3	4,0

Nota: En el caso de *Physical Review*, sólo se incluyen los artículos originarios de las instituciones estadounidenses. Éstos correspondían al 93 por 100 del total de artículos. *Fuente:* Basado en datos de Weart 1979a y Bernal 1939.

tandarte de la física académica estadounidense, y pronto de la física mundial también. Los laboratorios industriales seguían contribuyendo sustancialmente a la revista, pero relativamente menos que en los años veinte. Muchos de sus artículos aparecían más bien en el *Journal of Applied Physics,* una revista establecida por la American Physical Society en 1931. Las cifras de distribución de artículos, según las fuentes que tengamos, en las principales revistas de física pura británicas y estadounidenses se muestran en la tabla 17.1. Las cifras no son directamente comparables, pero sí indican la bajada en la participación de físicos industriales en artículos en *Physical Review* en los años treinta. Esta participación era mayor en el caso de Gran Bretaña, pero no tan marcada a mediados de los treinta. Por esa época, *Physical Review* estaba tan claramente dominada por contribuciones procedentes de universidades como sus homólogas británicas.

La existencia o no de estilos nacionales en la ciencia es materia de debate entre historiadores y filósofos. Para muchos físicos europeos de visita en los años veinte y treinta, parecía claro que, de hecho, existía un estilo estadounidense de física que difería del que se conocía en Europa. Por ejemplo, las fronteras entre física e industria, entre experimentales y teóricos, y entre la física y las ciencias adyacentes, como la química y la astronomía, eran menos rígidas en el sistema de Estados Unidos. Los estadounidenses eran más informales y a menudo trabajaban en grupos sin una jerarquía estricta. Además, los estadounidenses parecían más dispuestos a convertir su trabajo científico en patentes y, en general, a comercializar la ciencia. No tenían miedo de la publicidad y trataban activamente de interesar a la prensa en su trabajo, y utilizarla en su beneficio. En 1934, se formó en Estados Unidos la Asociación Nacional de Escritores Científicos, y la American Physical Society comenzó una campaña de propaganda de la física. Cuando la Asociación Estadounidense por el Avance de la Ciencia celebró su reunión de 1935, había no menos de dieciséis reporteros presentes. Los científicos y los reporteros estadounidenses cooperaban en vender al público la física, un fenómeno todavía desconocido en Europa. Pero lo que la mayoría de los europeos percibía en la física estadounidense era su ritmo de trabajo (trabajaban en los laboratorios hasta durante los fines de semana) y su pasión por las máquinas grandes. Según Franz Simon, un físico de bajas temperaturas alemán que visitó los Estados Unidos en 1932, «parece que los estadounidenses trabajan muy bien, sólo que obviamente insisten en hacerlo todo tan grande como sea posible». Un físico belga quedó impresionado por la «riqueza del laboratorio» e inspirado por la «constructiva civilización del "hacia adelante" [*go ahead*]» (Heilbron y Seidel 1989, p. 36). Para muchos europeos, tanto visitantes como emigrantes, la predilección estadounidense por las máquinas grandes y la tecnología compleja era un síntoma de inmadurez intelectual. Los experimentales estadounidenses, ¿estaban haciendo física o ingeniería? ¿Tenían el tiempo y la capacidad para pensar? Según Walter Elsasser, «los estadounidenses están por lo general poco pulidos, muy buenos trabajadores pero sin muchas ideas en la cabeza [...] Su número es impresionante, es cierto, pero uno no debería preocuparse mucho por sus instalaciones técnicas» (*ibid.*, p. 350).

Migraciones intelectuales

Como resultado de los tumultos políticos en Europa, un gran número de físicos se vio despedido, se sintió amenazado o decidió por otros motivos que ya no podía quedarse en el país donde trabajaba (véase capítulo 16). La mayoría de los físicos emigrantes eran judíos alemanes, pero también había emigrantes europeos que no eran judíos o alemanes. No todos eran refugiados, en el sentido de que hubieran sido despedidos o forzados a abandonar sus países nativos, y muchos de los emigrantes llegaron a sus nuevos países antes de 1933, o dejaron sus patrias después de 1933 sin ser despedidos o expulsados. En la práctica, sin embargo, eran en todo caso refugiados. Simplemente, decidieron irse antes de verse obligados a ello, o algo peor, y al salir por primera vez de Alemania en muchos casos no tenían posibilidad de volver. Por ejemplo, Wigner y Von Neumann ya habían llegado a América en 1930, con un acuerdo de medio curso, con la otra mitad de su trabajo en Alemania; técnicamente no eran refugiados, pero tras 1933, cuando fueron despedidos de sus plazas en Berlín, no podían volver a Alemania. George Hevesy, el químico y físico judío húngaro profesor en la Universidad de Friburgo, no fue despedido y al principio quiso quedarse en Alemania; pero en mayo de 1933, tras ser testigo de la primera andanada de despidos de judíos, decidió que era poco seguro quedarse y se fue a Copenhague.

Muchos de los físicos refugiados emigraron al principio a países cercanos, como Dinamarca, Suiza, Países Bajos o Francia, pero en la mayoría de los casos se quedaron en éstos sólo durante un breve periodo, para luego proseguir hacia Gran Bretaña o Estados Unidos; o, en muchos casos, primero hacia Gran Bretaña y luego a Estados Unidos. Hevesy, que se quedó en Dinamarca hasta 1943 y huyó después a Suecia, fue una excepción. Un grupo menor de científicos y académicos desplazados, incluyendo al físico Richard von Mises y al astrónomo Erwin Freundlich, se fueron a la recién reorganizada universidad de Estambul, pero en la mayoría de los casos tan sólo para proseguir hacia Estados Unidos u otros sitios. Las condiciones en Estambul no eran satisfactorias, entre otros motivos porque toda la docencia debía impartirse en turco. Además, la mayor parte de los físicos con esperanzas de encontrar refugio permanente en la Unión Soviética quedaron decepcionados. Después de 1937 fueron o bien despedidos, exiliados o encarcelados. Otra posibilidad más para los científicos judíos desplazados era la Universidad Hebrea de Jerusalén, donde los sionistas (entre ellos Einstein) intentaban establecer un potente claustro científico. Aunque unos treinta países acogieron a físicos desplazados entre 1933 y 1945, las naciones receptoras de físicos emigrantes más importantes fueron, con mucho, Gran Bretaña y Estados Unidos. La tabla 17.2 muestra un número de físicos selectos que emigraron a uno de estos dos países.

Muchas organizaciones académicas nacionales e internacionales respondieron rápidamente a la despedida de académicos alemanes y a la supresión de la libertad académica. Sin embargo, durante muchos años existió la tendencia de evitar la crítica directa de tipo político, y un deseo de tratar con las cuestiones de principios de una manera bastante abstracta. Eran comunes las declaraciones solemnes sobre la libertad intelectual y la internacionalidad y neutralidad de la ciencia, pero la acción o la crítica

TABLA 17.2
Destinos de los físicos europeos emigrantes

Gran Bretaña	*EEUU*	*EEUU vía Gran Bretaña*
M. Born* (G)	V. Bargmann (G)	G. Beck (A)
P. P. Ewald (G)	F. Bloch* (S)	H. Bethe* (G)
H. Fröhlich	L. Brillouin (F)	F. Ehrenhaft (A)
R. Fürth (G)	P. Debey† (N)	O. Frisch (A)
D. Gabor* (G)	M. Delbrück* (G)	K. Fuchs (G)
W. Heitler (G)	A. Einstein† (G)	G. Hertz† (G)
N. Kemmer (G)	W. Elsasser (G)	F. London (G)
N. Kurti (G)	E. Fermi† (I)	E. Rabinowitch (G)
K. Mendelssohn (G)	J. Franck† (G)	O. Stern* (G)
E. Schrödinger† (A)	G. Herzberg* (G)	L. Szilard (H)
F. Simon (G)	R. Landenburg (G)	E. Teller (G)
	A. Landé (G)	
	E. Segré* (I)	
	L. Tisza (H)	
	V. Wisskopf (G)	
	E. Wigner* (H)	

Nota: Las personas señaladas con una daga eran premios Nobel cuando emigraron; aquellos con un asterisco recibieron el premio Nobel después de emigrar. La letra posterior al nombre da la nacionalidad en el momento de la emigración: A = austriaco; F = francés; G = alemán; H = húngaro; I = italiano; N = holandés; S = suizo

comunes lo eran muchos menos. Esta crítica abierta procedía sobre todo de los mismos científicos, raras veces de sus organizaciones profesionales. Por ejemplo, en 1934 un grupo de distinguidos académicos europeos, que incluía a Ernest Rutherford, Paul Langevin y Jean Perrin, condenó lo que consideraban el mal uso de la ciencia en Alemania, en concreto, que «las ciencias exactas se hayan degradado abiertamente para acabar sirviendo a las industrias bélicas» y que «sólo se favorezcan las investigaciones que proporcionen con cierta certeza un avance técnico directo» (Weiner 1969, p. 209). Por supuesto, en unos pocos años, los físicos británicos y estadounidenses estaban por su parte trabajando con entusiasmo para «degradar» exactamente las ciencias exactas al servicio del ejército. Otro manifiesto, firmado por más de mil científicos estadounidenses, condenaba el movimiento de física aria como «un ataque contra la física teórica, y por implicación obvia, contra la teoría científica en general» (*ibid.*). Incluso esta crítica era bastante blanda, pero los científicos y sus organizaciones poco podían hacer para cambiar la situación en Alemania. Lo que sí podían hacer era ayudar a sus desafortunados colegas refugiados con dinero y plazas. En este sentido, los físicos reaccionaron rápida y eficazmente, demostrando con la práctica que la «comunidad interna-

cional de físicos» era más que una mera frase ceremonial. En 1933-1934 los físicos de fuera de Alemania formaron varias organizaciones de ayuda, la mayoría de ellas basadas en iniciativas de físicos individuales y sin apoyo oficial de cuerpos gubernamentales. Recibían apoyo de regalos individuales y donaciones de fundaciones privadas. Muchos científicos accedieron a pagar entre un 1 y un 3 por 100 de sus salarios por esta noble causa. En 1933 los académicos alemanes refugiados organizaron la Notgemeinschaft deutscher Wissenschaftler im Ausland (Sociedad de Emergencia para los Científicos Alemanes en el Extranjero), con sede primero en Zurich y más adelante en Londres, donde la organización recibió ayuda de sociedades académicas británicas.

En Inglaterra, el Academic Assistance Council (AAC) (Consejo de Asistencia Académica) se estableció en 1933 como un cuerpo coordinador que intentaba encontrar plazas temporales para científicos refugiados. Su propósito era «defender el principio de libertad académica y ayudar a aquellos académicos y científicos de cualquier nacionalidad a los que, por motivos de religión, raza u opinión política, se les impide continuar su trabajo en sus propios países» (Weiner 1969, p. 211). Al AAC se le cambió más adelante el nombre por el de Society for Protection of Science and Learning. Su primer presidente fue Rutherford y entre los partidarios más activos del consejo estaba Leo Szilard, el físico judío húngaro que había emigrado de Alemania a Inglaterra después de que Hitler llegara al poder. Según un estudio, sesenta y siete físicos de Europa central llegaron a Gran Bretaña, y de éstos, casi la mitad emigró a otros países, en la mayoría de los casos a los Estados Unidos. Otro estudio muestra que el 37 por 100 de los científicos e ingenieros emigrantes al principio buscaron el exilio en Gran Bretaña y, algunos menos, el 35 por 100 en los Estados Unidos. El sistema universitario estadounidense, mayor y más dinámico, estaba más adecuado para absorber a los emigrantes, de los cuales el 57 por 100 acabó en Estados Unidos y sólo el 11 por 100 en Gran Bretaña. Esto estaba en concordancia con la política del AAC, que preparaba un apoyo temporal y animaba abiertamente a los científicos refugiados a que siguieran y cruzaran el Atlántico para buscar plazas permanentes. El AAC se describía a sí mismo como una cámara de compensación bancaria y proclamaba claramente que «Estados Unidos es el principal país de destino» (Hoch 1983, p. 230).

La mayoría de los inmigrantes británicos vivían de becas temporales de investigación y sólo unos pocos obtuvieron plazas académicas permanentes antes del estallido de la guerra. La integración en la física británica era difícil, y sólo había un número muy limitado de trabajos. Quizá la disposición a encontrar trabajos en Gran Bretaña era también limitada. Cuando el físico alemán George Jaffé intentó encontrar un trabajo en Gran Bretaña en 1933, le informaron: «Me parece que existe una fuerte sensación de que el colegio [universitario] ya ha absorbido su cuota y que no se pueden sopesar nuevas solicitudes. No hay duda de que esta sensación se debe sobre todo a un miedo de que estas admisiones acaben probablemente reaccionando desastrosamente con las perspectivas, ya escasas, de empleo y promoción de nuestros propios licenciados y profesores» (Rider 1984, p. 131). Hasta los físicos famosos tuvieron dificultades en encontrar plazas permanentes. En 1933 Max Born aceptó una oferta para ir a la

Universidad de Cambridge, sin saber por cuánto tiempo sería el contrato. Consideró plazas en sitios remotos como Bangalore y Moscú, y se quedó muy aliviado cuando en 1936 se le ofreció la cátedra de filosofía natural (física teórica) en la Universidad de Edimburgo.

La difícil situación en Gran Bretaña se alivió con la fundación de un programa para físicos y químicos desplazados establecida por la gran Imperial Chemical Industries (ICI) en 1933. La ICI proporcionó un gran número de becas de dos o tres años de duración, en parte, pero no sólo, a científicos expertos en temas de interés para la compañía. Entre los becarios ICI estuvieron Schrödinger, Franz Simon y Fritz London. Un resultado notable de la generosidad de ICI fue que la física de bajas temperaturas se convirtió en una especialidad británica, sobre todo gracias al trabajo de eminentes físicos refugiados como Kurt Mendelsohn y Simon. Cuando se declaró la guerra, muchos de los refugiados alemanes y austriacos fueron internados como extranjeros enemigos, a veces en duras condiciones. A algunos se les internó en Gran Bretaña, pero otros fueron deportados a Canadá, entre ellos los jóvenes físicos austriacos Walter Kohn y Hermann Bondi. Kohn fue a los Estados Unidos, donde se convirtió en un importante teórico del estado sólido, mientras que Bondi regresó a Inglaterra, donde comenzó su distinguida carrera en cosmología y relatividad.

La organizaciones de ayuda en los Estados Unidos seguían el patrón de Inglaterra, con el Emergency Committee in Aid of Displaced German Scholars asumiendo el papel correspondiente al de la AAC. El Emergency Committee típicamente proporcionaba becas para apoyar a científicos emigrantes en universidades que no contaban con fondos para las plazas. Algo del dinero procedía de contribuciones individuales de científicos estadounidenses y una gran parte de becas proporcionadas por la Fundación Rockefeller y otras filantropías. La Fundación Rockefeller estableció un Fondo Especial de Ayuda a la Investigación para Académicos Desplazados, que, entre 1933 y 1939, proporcionó 775.000 dólares en becas. Los estadounidenses eran muy conscientes de las apuradas situaciones económicas de sus universidades, y también del peligro de conflictos entre científicos foráneos y jóvenes estadounidenses buscando trabajo. Por este motivo, el apoyo del Emergency Committee se restringía a «académicos maduros de distinción que ya cuenten con reputación», mientras que los científicos jóvenes, que podían competir con los solicitantes estadounidenses con mayor probabilidad, tenían menor prioridad. La mayoría de los físicos de Europa central que obtuvieron plazas en universidades de Estados Unidos tenían treinta o cuarenta años.

Uno de los problemas que encontraron los físicos refugiados europeos fue el antisemitismo que existía en muchas universidades estadounidenses. Este fenómeno no era nuevo ni, por supuesto, un problema sólo para los emigrantes europeos. En 1937 Kemble recomendó a Eugene Feenberg, un físico judío estadounidense excelentemente cualificado, para plazas fuera de Harvard, donde Feenberg había terminado su doctorado, dirigido por Kemble. Feenberg, escribía Kemble intentando ser de ayuda, «es un tejano alto y delgado, y no parece un hebreo neoyorquino ni actúa como uno de ellos». La carta de recomendación no sirvió de nada. «Es prácticamente imposible para

nosotros emplear a un hombre de origen hebreo [...] en una institución sureña», le informaron a Kemble desde la Universidad de Carolina del Norte (Kevles 1987, p. 279). James Franck, el premio Nobel refugiado, se quejó de un creciente antisemitismo en Estados Unidos y creía que la hostilidad contra los judíos no era menor de la existente en Alemania antes de 1933.

A pesar de los muchos problemas que los físicos emigrantes encontraban al llegar a Estados Unidos, la asimilación fue notablemente bien para la mayoría de los cien físicos, aproximadamente, que llegaron a Estados Unidos desde Europa entre 1933 y 1941. Un motivo principal de este éxito fue la recuperación que la física estadounidense experimentó tras la depresión, que colocó a los departamentos de física de Estados Unidos en una situación económica mejor que la mayor parte de los europeos. Muchos de los emigrantes eran teóricos y estaban acostumbrados no sólo al alto nivel de la física teórica alemana, sino a la más estricta separación entre experimentales y teóricos que existía en Europa. Al llegar a Estados Unidos, los emigrantes contribuyeron a aumentar el interés por la física teórica, elevando su nivel, y pronto aprendieron a apreciar la falta de separación clara entre teóricos y experimentales que caracterizaba a muchas universidades estadounidenses. Hans Bethe, uno de los físicos refugiados más importantes, encontró la atmósfera de la Universidad de Cornell mucho más estimulante que la de las universidades europeas. En Europa, recordaba, «era costumbre [...] dejar que el profesor se dirigiera a la clase y hablara y escribiera formalmente en la pizarra y luego se fuera. Los estudiantes escuchaban e intentarían entender [...] aquí, cuando un estudiante quiere, formula una pregunta. Creo que es mucho mejor.» (Weiner 1969, p. 223). Estados Unidos le dio mucho a Bethe, y él le dio mucho a cambio. Stanley Livingston, que trabajó con Bethe durante un tiempo, recordaba que «[Bethe] me ayudó a intuir los fundamentos de la física, y lo que pasaba en la física nuclear [...] Oí hablar de muchos nuevos tipos de conceptos, como momentos magnéticos y aspectos cuánticos, de los cuales nunca había oído cuando estaba con Lawrence [en Berkeley]. Era un entorno distinto, ahora estaba siguiendo a un académico y estaba muy impresionado» (Stuewer 1984, p. 34).

No puede haber duda de que la física estadounidense resultó muy fortalecida por el flujo de emigrantes europeos. Especialmente en muchos campos teóricos, como la electrodinámica cuántica, la teoría nuclear, la relatividad y la teoría del estado sólido, los emigrantes resultaron ser una preciosa adquisición. Sin embargo, pudieron florecer en el entorno estadounidense sólo porque ya existía una fuerte base, tanto institucional como intelectual, y tanto en teoría como en experimentación. Al contrario de lo que frecuentemente se cree, Estados Unidos no se convirtió en la nación líder en investigación física simplemente por su ganancia de cerebros. En 1936 *Newsweek* podía declarar orgullosamente (y también correctamente), «los Estados Unidos lideran la física mundial». El liderazgo se vio fortalecido por la ola de emigrantes europeos, pero fue creado sobre todo por físicos estadounidenses y los impresionantes logros de este país en educación superior e instituciones científicas. A los emigrantes se les dio la bienvenida a las universidades estadounidenses en parte por sentimientos humanita-

rios generales y en parte porque los físicos y administradores científicos de Estados Unidos se dieron cuenta de que serían una valiosa contribución al sistema de investigación. Los motivos no fueron políticos en el sentido de que Estados Unidos quisiera despojar a Alemania de sus mejores cerebros, pero cuando sobrevino la guerra, quedó claro que esto fue un premio adicional. En junio de 1941, en un momento en el que Estados Unidos era todavía formalmente un país neutral, este resultado estratégico de la migración individual fue señalado por un profesor, Gortner, en una carta al presidente del Emergency Committee, Stephen Duggan. Gortner razonaba así: «Creo firmemente que podríamos reducir los logros tecnológicos de Europa central al nivel de los logros tecnológicos de España o Portugal si pudiéramos desplazar a mil de sus hombres estratégicos, que son líderes en el campo de las ciencias naturales, y a largo plazo la batalla por la democracia sería ganada más económicamente haciendo justamente esto y los resultados serían mucho más permanentes de lo que podría alguna vez conseguirse con los miles de millones de dólares que estamos encauzando hacia nuestro programa de defensa» (Fischer 1988, p. 84). Una interesante reflexión, pero no fue así como acabaron sucediendo las cosas.

Los físicos emigrantes eran personas, no sólo cifras estadísticas. Consideremos como ejemplo el destino de Fritz London, un físico alemán judío nacido en Polonia en 1900. London, que había empezado su trayectoria académica como estudiante de filosofía, llevó a cabo importantes trabajos en mecánica cuántica y trabajó en Zurich con Schrödinger, a quien siguió a Berlín. Durante su periodo en Zurich en 1927 escribió, con Heitler, el artículo pionero de la química cuántica, explicando por primera vez el enlace covalente en términos de la mecánica cuántica. Durante sus años en Berlín, se ocupó sobre todo de problemas de física química. En 1933, London tenía una reputación de físico original y eminente, aunque no tanta como el calibre de un premio Nobel (sería nominado para el premio una vez, pero en Química). Con la introducción de las leyes nazis de 1933, se vio forzado a pedir la excedencia de la Universidad de Berlín, lo cual significaba en realidad un despido. Como muchos de sus colegas, recibió ayuda de la red informal de física y en agosto de 1933 obtuvo una beca ICI en la Universidad de Oxford. Una vez en Inglaterra, cambió sus intereses hacia la física de bajas temperaturas y pasó a ser miembro del grupo formado alrededor de Simon y Mendelssohn. Junto con su hermano menor Heinz, otro miembro refugiado del grupo de Oxford, London desarrolló la primera teoría (macroscópica) exitosa de la superconductividad. Aunque fructífera científicamente, la estancia de London en Inglaterra no fue feliz, y después de tres años se le informó de que la beca ICI se había interrumpido sin posibilidades de extensión. Consiguió obtener una plaza de investigación en el Institut Henri Poincaré en París; para el primer año recibió un beca del Comité Français d'Accueil aux Savants Etrangers (Comité Francés de Ayuda a Académicos Extranjeros), la contraparte francesa del AAC. En París prosiguió sus estudios sobre superconductividad y superfluidez. A London le gustó París y declinó una oferta para ir a la Universidad Hebrea de Jerusalén, pero en 1938 aceptó la plaza de profesor visitante para el curso 1938-1939 en la Universidad Duke en Carolina del Norte. De vuelta a

Europa, recibió una nueva oferta de Duke, esta vez para una plaza permanente como profesor de química teórica. Partió hacia Estados Unidos el 1 de septiembre de 1939, el día en que el ejército alemán invadió Polonia. Muchos de los físicos refugiados se asimilaron rápidamente en el entorno estadounidense, pero no todos lo pudieron hacer tan fácilmente como Bethe, Fermi o Weisskopf. London estaba profundamente inmerso en la cultura intelectual europea y notaba fuertemente las diferencias entre su mundo y el del sur estadounidense. Escribió a Frédéric Joliot: «Soy demasiado europeo para conseguir entusiasmarme con la vida aquí, la cual es demasiado tranquila hasta para esos infantiles adultos [...] Me parece que la gente aquí carece de pasiones salvo para el bridge y el fútbol» (Gavroglu 1995, p. 169).

CAPÍTULO 18

Del enigma del uranio a Hiroshima

El camino a la fisión

Tan pronto se descubrió el neutrón, los físicos se dieron cuenta de que la nueva partícula, debido a su carencia de carga eléctrica, podría utilizarse como un efectivo proyectil en reacciones nucleares. Las primeras transmutaciones que se hicieron públicas, en 1932-1934, utilizaron neutrones rápidos incidiendo sobre núcleos ligeros, como el aluminio. Los resultados eran procesos (n,α), (n,p) y (n,γ), es decir, la expulsión de partículas alfa, protones o radiación gamma. Por aquel entonces, Fermi y su grupo en Roma comenzaron un estudio sistemático de las reacciones de los neutrones con todos los elementos del sistema periódico a partir del hidrógeno. Como fuente de neutrones, utilizaron un tubo de vidrio sellado que contenía polvo de berilio y radón. En el curso de su trabajo, los científicos italianos descubrieron (de manera puramente accidental) que los neutrones que habían pasado a través de parafina, madera o agua eran mucho más efectivos a la hora de producir isótopos radiactivos. Concluyeron que los neutrones se habían frenado en colisiones con núcleos de hidrógeno. Experimentos adicionales confirmaron que los neutrones lentos se capturaban más fácilmente que los rápidos. Cuando los italianos bombardearon uranio con neutrones lentos, consiguieron identificar varios productos que emitían rayos beta, uno de ellos con una vida media de 13 minutos. Fermi, Franco Rasetti y Oscar D'Agostino hallaron que la actividad no podía deberse a isótopos entre el uranio y el plomo, y que esta evidencia negativa «sugería la posibilidad de que el número atómico del elemento sea superior a 92» (Wohlfarth 1979, p. 58). El anuncio llegó a los titulares de prensa, y en Italia se celebró como un gran triunfo de la cultura fascista. Aunque perturbado por la publicidad, Fermi creía que había manufacturado los primeros elementos transuránicos. En diciembre de 1938, en su discurso Nobel en Estocolmo, habló con confianza sobre el «ausonio» y el «hesperio», los nombres utilizados en Roma para los elementos 93 y 94.

El anuncio de 1934 por parte de Roma causó que Otto Hahn y Lise Meitner en el Instituto de Química Kaiser Wilhelm de Berlín emprendieran un trabajo similar. El

instituto, que se había fundado en 1912, estaba financiado por aquel entonces sobre todo por la industria química, directa o indirectamente por la compañía I. G. Farben, la gigantesca empresa química alemana. Al principio Meitner y Hahn creían haber encontrado también elementos transuránicos, e informaron en 1935 «parece muy probable que las actividades de 13 y 90 minutos sean elementos más allá del número 92» (Graetzer y Anderson 1971, p. 24). Por otra parte, los resultados de Fermi fueron criticados por Ida Noddack (de apellido de soltera, Tacke), una química alemana que, junto con su difunto esposo Walter Noddack, había descubierto el elemento renio en 1925. Ida Noddack pensaba que las conclusiones de Fermi no tenían ninguna base y negaba que se hubieran producido elementos transuránicos. Después de todo, aducía, no se conocía casi nada sobre reacciones nucleares inducidas por neutrones así que, ¿por que suponer que el producto estaba al final de la tabla periódica? «Es concebible», escribió, «que en el bombardeo de núcleos pesados con neutrones, estos núcleos se rompan en varios fragmentos grandes que en realidad son isótopos de elementos conocidos, pero no son vecinos de los elementos irradiados» (Wohlfarth 1979, p. 63). La anticipación de Noddack de la fisión nuclear no tuvo ningún impacto en lo que sucedería. Aunque se publicó en una revista de química *(Zeitschrift für angewandte Chemie)*, tanto Fermi como Hahn y Meitner la conocían, pero no se tomaron la sugerencia en serio. No sólo el artículo de Noddack era altamente crítico y su sugerencia especulativa, sino que la reputación científica de la autora había sido algo dañada por su controvertida afirmación de haber descubierto el elemento 43 (que ella denominó masurio y ahora se conoce como tecnecio, producido por primera vez en 1937 por E. Segré y Carlo Perrier). Noddack no fue «rehabilitada» como precursora de la hipótesis de la fisión hasta los años noventa.

A partir de 1935, los centros de investigación del uranio se mudaron de Roma a Berlín y París, y los dos grupos iniciaron lo que puede describir más como una rivalidad que una cooperación. Aunque los grupos de París y Berlín eran, con mucho, los más importantes, no eran los únicos interesados en el uranio irradiado con neutrones. Por ejemplo, en Berkeley, Philip Abelson intentaba identificar los productos supuestamente transuránicos mediante el método de espectroscopía de rayos X, que estaba comprobado y era preciso. Sin embargo, al buscar números atómicos mayores que 92, Abelson no pudo interpretar correctamente sus líneas de rayos X. Cuando se hizo conocida la hipótesis de la fisión, Abelson encontró rápidamente evidencia del telurio y así confirmó la hipótesis. En Berlín, Hahn y Meitner realizaron numerosos experimentos, propusieron elaborados esquemas de desintegración, e imaginaron una variedad de hipótesis para aclarar lo que sucedía cuando se bombardeaba uranio con neutrones. Después de dos años de arduo trabajo, su principal conclusión fue decepcionante: que el uranio irradiado producía productos complejos de naturaleza desconocida, probablemente incluyendo algunos isótopos transuránicos. Pero no todo su trabajo fue en vano. Una de sus hipótesis era que los productos del uranio eran isómeros de uranio, es decir, isótopos con diferentes vidas medias pero con el mismo número de protones y neutrones. Por aquel entonces, la isomería nuclear no se aceptaba mayoritariamente.

y el único caso conocido (y controvertido) era el «uranio Z» del que Hahn había informado como un isómero del protactinio en 1921.

El trabajo de Hahn y Meitner probó la existencia de los isómeros pero no resolvió el enigma del uranio. En París, Irène Joliot-Curie trabajaba en el mismo problema pero adoptando un enfoque algo distinto. En 1937, junto con Pavel Savitch, un físico yugoslavo que trabajaba en París, informó sobre una sustancia con una vida media de 3,5 horas en uranio irradiado. Al principio pensaron que era torio, pero después de trabajos adicionales concluyeron en octubre de 1938 que seguía al lantano en separaciones químicas y era por tanto posiblemente el actinio (aunque «en general las propiedades de R 3,5 hr son las del lantano»). Entonces, en el tercer asalto, sugirieron que la sustancia de 3,5 horas no podía ser un isótopo del actinio, sino que probablemente era un nuevo elemento transuránico. Si hubieran sugerido que la cercana similitud química con el lantano era evidencia de un isótopo del lantano con una vida media de 3,5 horas, podrían haber descubierto la fisión. Pero no lo hicieron. Los resultados de Curie y Savitch desconcertaron al equipo de Berlín, el cual se había amplios a partir de 1935 con la inclusión de Friedrich Strassmann, un químico analítico. Mientras deliberaban sobre cómo entender los experimentos de París, Meitner decidió abandonar Alemania en julio de 1938; la tarea de encontrar una solución quedaba ahora en manos de Hahn y Strassmann. Sin embargo, se comunicaban por correo con Meitner, que oficiosamente pertenecía todavía al grupo de Berlín.

Fue el intento de explicar los resultados de Curie-Savitch lo que llevó a Hahn y Strassmann a la fisión. Entre las actividades resultantes del bombardeo del uranio con neutrones, encontraron una que se precipitaba con el bario y, por tanto, concluyeron que se trataba probablemente de un nuevo isótopo del radio. Les parecía que el isótopo parecido al lantano podría ser actinio, creado a partir del radio por desintegración beta. Pero ¿podía producirse radio a partir de uranio mediante la emisión de dos partículas alfa? Bohr, Meitner y otros teóricos lo negaban, y Hahn y Strassmann volvieron al laboratorio. A principios de diciembre de 1938 empezaron a darse cuenta que lo que creían que era radio se comportaba bastante como el bario, mucho más de lo que podría esperarse a partir de la similitud química de los dos elementos. Si así fuera, la sustancia de Curie-Savitch podía ser lantano, producido por bario con actividad beta. El 18 de diciembre de 1938 tenían evidencia experimental de que lo que se comportaba como bario era, con toda probabilidad, bario. Pero parecía increíble que el uranio se transformara en un elemento mucho más ligero, y a Hahn le costó formular la conclusión. «Quizá podrías proponer algún tipo de explicación fantástica», escribió a Meitner el 19 de diciembre. «Por nuestra parte, sabemos que [el uranio] *no puede* en realidad reventar para formar bario» (Weart 1983, p. 112). Hasta en el artículo de Hahn y Strassmann de 6 de enero de 1939, los dos autores evitaron una afirmación clara de que se había producido bario mediante uranio irradiado con neutrones. «Como químicos», escribieron, «deberíamos reemplazar los símbolos Ra, Ac y Th [...] en [nuestro] esquema [...] por Ba, La y Ce... [Pero] como químicos nucleares, íntimamente asociados a la física, no podemos decidirnos a tomar este paso en contradicción

con toda experiencia previa en física nuclear» (Wohlfarth 1979, p. 58). Pero ahora atisbaban una posible explicación. Habían encontrado entre los supuestos elementos transuránicos uno que se parecía al renio. Si el «radio» era bario, entonces el «renio transuránico» podía ser un homólogo inferior del renio, es decir, el elemento 43, masurio (Ma). Como comentaron Hahn y Strassmann: «¡La suma de los números másicos Ba + Ma, es decir, por ejemplo 138+101, da 239!».

Esta inspiración de que el núcleo de uranio podría partirse al capturar un neutrón lento fue obtenida por primera vez por Meitner y su sobrino Otto Frisch, ambos refugiados del Tercer Reich. Frisch trabajaba con Bohr en Copenhague y su tía estaba en Estocolmo, donde ocupaba una plaza en el instituto Manne Siegbahn. Cuando los dos se encontraron a finales de diciembre de 1938 para pasar las vacaciones de Navidad en Kungälv, cerca de Gotemburgo, todavía no habían recibido una copia del artículo de Hahn y Strassmann. Pero sabían de sus resultados e intentaron imaginarse lo que sucedía en el núcleo de uranio en el laboratorio de Berlín. Frisch recordaba: «Caminábamos arriba y abajo sobre la nieve, yo en esquíes y ella a pie [...] y gradualmente fue tomando forma la idea de que esto no era un desgajamiento o fractura del núcleo, sino un proceso que había que explicar mediante la idea de Bohr de que el núcleo era como una gota líquida; una gota de este tipo podría alargarse y dividirse» (Frisch y Wheeler 1967, p. 276). El modelo nuclear de la gota líquida se remontaba a trabajos de Gamow en 1929 y durante la siguiente década fue desarrollado por Bohr, Von Weizsäcker y otros. La versión de Bohr de 1936, conocida como el núcleo compuesto, era particularmente importante y muy adecuada para iluminar el mecanismo de las reacciones neutrónicas. La teoría del núcleo compuesto era bien conocida para Frisch, que se dio cuenta de que podría proporcionar una explicación de la anomalía de Hahn-Strassmann. El proceso de división se denominó «fisión», un nombre sugerido a Frisch por un biólogo estadounidense que trabajaba en el instituto de Bohr. Meitner y Frisch publicaron la primera hipótesis de fisión en una carta a *Nature* el 16 de enero de 1939. La hipótesis era que el núcleo de uranio «tras la captura del neutrón, se divide en dos núcleos de tamaños aproximadamente iguales». Además, la fisión sería un proceso violento: «Los dos núcleos se repelerán mutuamente y ganarán una energía cinética total de unos 200 MeV, según se puede calcular del radio nuclear y la carga. Esta cantidad de energía en realidad podría esperarse que estaría disponible debido a la diferencia en la fracción de empaquetamiento entre el uranio y los elementos en la mitad del sistema periódico» (Graetzer y Anderson 1971, p. 52). Meitner y Frisch también utilizaron la ocasión para sugerir que el torio experimentaba una fisión similar a la del uranio. Habían sugerido privadamente a Hahn y Strassmann que buscaran gases nobles radiactivos (criptón y xenón) como productos de la fisión, y cuando Strassmann encontró los gases, la hipótesis de la fisión encontró un cimiento. Es notable que el descubrimiento de la fisión, uno de los más importantes de la física del siglo XX, se deba a dos químicos trabajando en un laboratorio de química, y no a físicos nucleares. De hecho, el descubrimiento sorprendió a la comunidad física. Ni siquiera los físicos de Berlín eran conscientes de que algo altamente interesante estaba sucediendo en el Instituto de Química Kaiser Wilhelm.

Más que tonterías

Las noticias sobre la ruptura del núcleo de uranio se propagaron rápidamente en la comunidad física internacional. La ruta comenzó en Copenhague, donde Frisch había discutido el asunto con Bohr, que estaba preparándose para irse a Estados Unidos. Bohr quedó muy sorprendido, pero aceptó inmediatamente la hipótesis de la fisión. Estaba, como Frisch escribió a Meitner el 3 de enero de 1939, «tan sólo asombrado de que no hubiera pensado antes en esta posibilidad, que se sigue tan directamente de las concepciones actuales de la estructura nuclear», es decir, el modelo de núcleo compuesto (Stuewer 1994, p. 78). Bohr y su colaborador, Léon Rosenfeld, llegaron a Nueva York el 16 de enero de 1939, y Rosenfeld fue directamente a Princeton, donde discutió las conclusiones obtenidas en Alemania, Suecia y Dinamarca. El anuncio, realizado antes de que el artículo de Meitner y Frisch se publicara, causó sensación. Fermi, John Wheeler y otros físicos estadounidenses empezaron inmediatamente a trabajar en el proceso de fisión. A finales de enero de 1939, Bohr acudió a la Quinta Conferencia de Washington sobre Física Teórica, donde debatió con Fermi el nuevo tipo de proceso y Bohr lo explicó cualitativamente desde el punto de vista del modelo de la gota líquida. «Todo el asunto fue una noticia bastante inesperada para todos los presentes», tres físicos estadounidenses informaron en el ejemplar del 15 de febrero de *Physical Review*. La fisión era todavía una hipótesis, y la primera fase del trabajo, tanto en Europa como en Estados Unidos, y se trataba de verificar la sugerencia de Meitner y Frisch. Utilizando diferentes métodos, esto se realizó en uno o dos meses, primero por Frisch en Copenhague, que utilizó un oscilógrafo para registrar los pulsos eléctricos producidos por los fragmentos de la fisión en una cámara de ionización. Poco después, los físicos de Berkeley Dale Corson y R. Thornton produjeron la primera prueba visual de la fisión mediante una fotografía de cámara de niebla.

A finales de febrero, ya no había duda alguna sobre la realidad de la fisión del uranio, y comenzó una segunda fase, que se ocupaba de la posibilidad de una reacción en cadena automantenida. La posibilidad de una reacción en cadena no se les había ocurrido a Frisch ni a Meitner. La posibilidad parece haber sido sugerida a Frisch por Christian Møller en Copenhague, pero al principio Frisch no la tomó en serio. Después de todo, todavía no había indicios de neutrones secundarios. Sin embargo, quedó pronto claro que si una reacción de fisión no resultaba simplemente en dos fragmentos nucleares, sino también en uno o más neutrones, una reacción en cadena podía ser una posibilidad. John Dunning, un físico de la Universidad de Columbia, estuvo entre los primeros en confirmar la hipótesis de fisión de Meitner-Frisch, cosa que hizo el 25 de enero de 1939. Como escribió en su cuaderno de laboratorio de esa fecha: «Creemos haber observado un nuevo fenómeno con extensas consecuencias. [...] ¡La energía atómica existe realmente! [...]. *¡Los neutrones secundarios son enormemente importantes!* Si se emitieran harían posible una reacción neutrónica automantenida, que desde 1932-1935 he considerado la principal esperanza para "quemar" materiales con neutrones lentos y liberar energía atómica» (Badash, Hodes y Tiddens 1986; cursiva en el original). La liberación de energía por proceso de fisión, estimada correctamente por

Meitner y Frisch en unos 200 MeV fue medida por físicos en las universidades de Columbia y Princeton en la primavera de 1939. Ambos grupos hallaron que los dos fragmentos de la fisión tenían masas desiguales y que la energía cinética de los fragmentos era cercana a 175 MeV. Esto dejaba unos 25 MeV para otros productos, incluyendo neutrones adicionales. La producción de estos neutrones fue mostrada por primera vez en marzo de 1939 por Frédéric Joliot y sus colaboradores Hans von Halban y Lev Kowarski, y algo más tarde por dos grupos estadounidenses. Los físicos franceses concluyeron que un número promedio de 3,5 neutrones se liberaba por fisión, una cifra que pronto se corrigió a 2,4. Lo importante era que los neutrones adicionales se producían en un número que podría hacer posible una reacción en cadena. A partir de consideraciones teóricas, sin embargo, Bohr sospechaba que el isótopo uranio-238, mucho más común, no se fisionaría con neutrones lentos, sino sólo el más raro (0,7 por 100) isótopo uranio-235. Bohr publicó su sugerencia en una nota breve el 15 de febrero. Pronto recibió apoyo de argumentos teóricos adicionales, Sitien carecía de confirmación experimental. Sólo en marzo de 1940 los experimentos probaron que Bohr tenía razón. El nuevo conocimiento parecía implicar que cualquier aplicación práctica de la energía de fisión sería extremadamente difícil y costosa.

En 1939, las especulaciones sobre la energía subatómica estaban lejos de ser algo nuevo. A partir del descubrimiento de la radiactividad, muchas personas, científicos y no científicos, habían sugerido que una nueva y potente fuente de energía se escondía en el interior del átomo. En 1903 Soddy describía la tierra dramáticamente como un «almacén repleto de explosivos, inconcebiblemente más poderosos que cualquiera de los que hoy conocemos, y posiblemente esperando sólo un detonador adecuado que haga que la tierra regrese al caos». Once años antes, en su libro *La liberación mundial,* el novelista H. G. Wells escribió sobre poderosas bombas atómicas. A Rutherford le molestaba toda esta palabrería sobre la energía atómica utilizada con fines pacíficos o militares. En 1933, en un discurso ante la Asociación Británica, dijo que «cualquiera que diga que con los recursos a nuestra disposición en estos momentos y con nuestro conocimiento actual podemos utilizar energía atómica está diciendo tonterías». Tres años después, Bohr se refirió al «muy discutido problema de liberar la energía nuclear con fines prácticos», concluyendo que «cuanto más avanza nuestro conocimiento de las reacciones nucleares, más parece alejarse este objetivo» (Rhode 1986, p. 227). El descubrimiento de la fisión no hizo que Bohr cambiara su cauta actitud. En un discurso a una audiencia danesa el 6 de diciembre de 1939, analizó los últimos avances en física nuclear, incluyendo la gran energía liberada en la fisión del uranio. «Se pueden entender las terroríficas perspectivas a las que nos enfrentaríamos si se pudieran hacer explotar cantidades sustanciales de uranio y torio», dijo. Pero no había motivo para preocuparse: «una consideración más cuidadosa muestra que no existe causa para la alarma a este respecto, aunque tampoco pueda decirse con total certeza que se pueda descartar cualquier liberación a gran escala de energía atómica». Tenía presente la dificultad de separar los dos isótopos de uranio. Sin embargo, otros físicos fueron rápidos en especular sobre una posible bomba de uranio. En febrero de 1939, Oppenhei-

mer escribió a Uhlenbeck: «Creo que realmente no es demasiado improbable que un cubo de diez cm de deuteruro de uranio (debería tenerse algo para frenar a los neutrones sin capturarlos) podría perfectamente explotar e irse al infierno» (Smith y Weiner 1980, p. 209).

A finales de 1939, se habían publicado más de 100 artículos sobre fisión y una gran cantidad de conocimiento había sido acumulado por parte de físicos en Europa y América. Las recensiones publicadas en Alemania, Inglaterra y Estados Unidos resumían este conocimiento. Una de las primeras recensiones, de Norman Feather, de la Universidad de Cambridge, completada en mayo de 1939, concluía que «la posibilidad de un proceso acumulativo de desintegración exotérmica debe ser considerada» (Graetzer y Anderson 1971, p. 79), y una recensión alemana de Siegfried Flügge, titulada «¿Puede el contenido energético de los núcleos atómicos hacerse técnicamente útil?» respondía a la pregunta afirmativamente, concluyendo que una «máquina atómica» era, en efecto, posible. La energía atómica no era todavía una realidad, pero definitivamente tampoco se trataba ya de tonterías. El entendimiento teórico era todavía incompleto, pero con la detallada teoría semiempírica de Bohr y Wheeler de septiembre de 1939, se establecieron unos cimientos para la comprensión posterior. El artículo de Bohr y Wheeler apareció en *Physical Review* el 1 de septiembre de 1939, el mismo día que comenzó la Segunda Guerra Mundial.

Aunque la posibilidad de una bomba de uranio no se discutió explícitamente durante las primeras y caóticas semanas de 1939, los físicos se dieron cuenta que la investigación en fisión podría llevar algún día a una primera bomba, y posiblemente alemana. Muchos de los físicos nucleares en Estados Unidos que emprendieron el estudio de la fisión eran inmigrantes recientes de Europa central, y estaban preocupados por la situación desde el comienzo. Entre ellos estaba Leo Szilard, el visionario refugiado húngaro que había trabajado en Inglaterra y ahora vivía en Estados Unidos, donde proseguía de manera entusiasta el trabajo sobre fisión. Ya en 1934, Szilard había concebido la idea de una reacción neutrónica en cadena que podría posiblemente llevar a una explosión violenta, pero había pensado en usar berilio, no uranio. Con el objeto de impedir que los alemanes produjeran una bomba de uranio, Szilard sugirió a sus colegas físicos en febrero de 1939 que mantuvieran secreta toda investigación sobre el uranio. La inusual sugerencia de Szilard se recibió con escepticismo, aunque varios físicos emigrantes estadounidenses apoyaron la idea. Pero también había físicos que se opusieron, por razones de prioridad, porque la encontraron poco realista o porque se oponían a la misma idea de secretismo, tan extraña a los ideales de la ciencia; y muchos pensaban que la posibilidad de una bomba era tan remota que ni siquiera veían el motivo de discutirla. Sin embargo, Szilard fue insistente y, tras algunas discusiones, la mayoría de los físicos principales estuvo dispuesta a apoyar el plan de secretismo. Pero no todos los físicos: Joliot y su grupo en París no deseaban dejar de publicar y, por esta razón entre otras, la idea de Szilard no se pudo llevar a cabo inmediatamente. Las revistas de física continuaron publicando artículos sobre fisión a lo largo de 1939, disponibles para cualquiera que pudiera entenderlos.

Sin embargo, con la declaración de guerra la situación cambió y, a partir de 1940, los físicos en Gran Bretaña y Estados Unidos estuvieron de acuerdo en parar todas las publicaciones de posible relevancia para el uso de la energía atómica. En Inglaterra, ya existía una detención de las publicaciones y, en abril de 1940, Gregory Breit fue nombrado director de un comité estadounidense de censura de la investigación sobre el uranio. No sólo es notable que los físicos estuvieran de acuerdo con una medida tan drástica, sino que lo hicieran de manera puramente voluntaria, sin ninguna presión por parte de sus gobiernos y que, de hecho, consiguieran que la investigación occidental sobre el uranio siguiera siendo un secreto, tanto para los científicos alemanes como, durante un tiempo, para los soviéticos. Uno de los últimos artículos sobre uranio que apareció en *Physical Review* fue el anuncio de Edwin McMillan y Abelson del descubrimiento del «elemento radiactivo 93» (el neptunio), que apareció en junio de 1940. El siguiente elemento transuránico, mucho más importante, el plutonio, fue producido por primera vez por el químico de Berkeley Glenn Seaborg y sus colaboradores en 1941, pero en un momento en que la parada de publicaciones estaba en vigor. El descubrimiento de Seaborg, galardonado con un Nobel, se hizo público por primera vez en 1946, cuando apareció con la nota al pie «Esta carta fue recibida para publicación en la fecha indicada [28 de enero, 1941] pero su publicación fue voluntariamente retenida hasta el fin de la guerra». Se añadieron muchas de estas notas al pie en artículos de los números de 1946 de *Physical Review*.

El primer intento serio de explorar la posibilidad de una bomba atómica tuvo lugar en Inglaterra, no en Estados Unidos. En marzo de 1940, Frisch y Peierls realizaron un rápido estudio sobre cómo se podría construir en principio una «superbomba» de uranio y cómo funcionaría. Estimaron que una masa de un kilogramo de uranio-235 metálico sería suficiente para una bomba y que «la energía liberada por una bomba de 5 kg sería equivalente a la de una de varios miles de toneladas de dinamita» y la radiación producida a «cien toneladas de radio». Aparte de delinear el mecanismo de la bomba, también mencionaban algunos de los aspectos políticos, éticos y militares de la «prácticamente irresistible» superbomba que, según temían, los alemanes ya estaban en proceso de desarrollar. Entre estos aspectos estaba que «debido al desplazamiento de sustancias radiactivas con el viento, la bomba no podría probablemente usarse sin matar a un gran número de civiles, y esto podría hacerla inapropiada como un arma para uso de esta nación» (Serber 1992, pp. 81 y 86). Como resultado del memorando de Frisch y Peierls, se formó un comité británico, llamado MAUD, para trabajar en la superbomba. Los físicos asociados al comité consideraron varios problemas, en particular los métodos de separación de isótopos, la posible producción de plutonio y la pérdida y multiplicación de neutrones en diferentes volúmenes de uranio. Muchos de los principales físicos británicos estuvieron involucrados, incluyendo refugiados como Frisch, Peierls, Kemmer, Simon, Kuhn, Kurti y Klaus Fuchs. Se les unieron Halban y Kowarski, huidos de París tras la caída de Francia. El comité MAUD escribió su informe final en el verano de 1941, concluyendo que una bomba atómica era factible pero también que para este trabajo era necesaria una organización mucho más grande. El

proyecto sería enorme y probablemente prohibitivamente caro para Gran Bretaña en solitario. Por aquel entonces, existía poca cooperación entre físicos británicos y estadounidenses que trabajasen en energía nuclear. La información sobre el trabajo británico en 1941 fue transferida a Moscú por Fuchs, el físico comunista refugiado alemán. Más adelante, durante la guerra, Fuchs se convirtió en una figura central en la red soviética de agentes que informaban a Moscú del progreso que se llevaba a cabo en el proyecto de la bomba estadounidense.

Hacia la bomba

El progreso del programa de la bomba estadounidense, generalmente conocido como Proyecto Manhattan, es bien conocido y se ha descrito en detalle en muchas ocasiones. Simplemente haremos mención de los pasos esenciales del programa que, según la tradición, comenzó con la carta que Einstein escribió al presidente Roosevelt en el verano de 1939. La famosa carta fue en realidad esbozada por Szilard tras consultas con Wigner y Teller. Einstein le dijo al presidente de Estados Unidos que tenía razones para creer que «el elemento uranio podría convertirse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato [...] Ahora parece casi seguro que esta [reacción en cadena] podría conseguirse en el futuro inmediato». Además, «[e]ste nuevo fenómeno conduciría además a la construcción de bombas, y es concebible (aunque no seguro) que se construyan así bombas extremadamente potentes de una nueva clase. Una única bomba de esta clase, transportada en barco y detonada en un puerto, podría perfectamente destruir la totalidad del puerto, junto con el territorio circundante. Sin embargo, estas bombas podrían resultar demasiado pesadas para su transporte aéreo» (Graetzer y Anderson 1971, p. 93). Los alemanes estaban posiblemente trabajando ya en esta línea (Einstein mencionaba explícitamente a Von Weizsäcker) y, por este motivo, Einstein aconsejaba a Roosevelt que pasara a la acción. La carta no tuvo efecto inmediato, salvo que el presidente nombró un comité asesor sobre el uranio. Alrededor de un año más tarde, los Estados Unidos empezaron a prepararse seriamente para la guerra, lo cual incluía la fundación de un Comité para la Investigación de la Defensa Nacional (NDRC) presidido por el ingeniero y físico Vannevar Bush. El Comité del Uranio se redefinió como un subcomité del NDRC. En 1941, el NDRC quedó absorbido en una organización mayor y más eficaz, la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico (OSRD), de nuevo con Bush a la cabeza. Por aquel entonces, físicos, químicos e ingenieros estadounidenses habían comenzado a trabajar en reacciones en cadena del uranio, pero estaban todavía en una fase exploratoria. El trabajo era experimental además de teórico e incluía, entre otras cosas, una teoría general de reacciones en cadena controladas desarrollada por Fermi, Wigner, Wheeler y otros. Un informe elaborado por Lawrence enfatizaba la posibilidad de utilizar plutonio como material para la bomba. «Si se dispone de grandes cantidades del elemento 94», escribía Lawrence, «es probable que se pueda producir una reacción en cadena con neutrones rápidos. En una reacción así la energía se liberaría a un ritmo explosivo que podría describirse como una "superbomba"» (Smyth 1945, p. 65).

Tras el ataque japonés a Pearl Harbor, el programa nuclear se expandió ampliamente y grandes cantidades de dinero del gobierno se destinaron a la investigación relacionada con la futura bomba nuclear. En la Universidad de Chicago se creó un Laboratorio de Metalurgia, o Met Lab, presidido por Arthur Compton y con Fermi como director del grupo de física nuclear experimental. El objetivo era ahora claro: construir una bomba atómica basada en uranio-235, o bien en plutonio. Compton decidió que un primer paso tenía que ser una reacción en cadena lenta, seguida de un reactor de uranio para producir plutonio, y después una bomba basada en el plutonio producido por el reactor. Según este plan, el reactor estaría listo en enero de 1943 y la bomba dos años después. El trabajo progresaba satisfactoriamente, y estudios teóricos y experimentales indicaban que en el tiempo previsto se tendría lista una bomba con una energía correspondiente al menos a dos kilotones de dinamita. Pero requeriría una enorme inversión y una organización de una escala y complejidad que sólo el ejército podía proporcionar. A principios de 1943, todos los esfuerzos se unificaron bajo una nueva organización militar, que recibió el nombre en clave de Distrito de Ingenieros de Manhattan y con el general de brigada Leslie Groves como presidente.

El primer paso del programa ampliado era fabricar un reactor primitivo con el objeto de determinar si era posible una reacción en cadena en el uranio. Ésta fue la labor de Fermi y sus colaboradores en la Universidad de Chicago, que emplearon ladrillos de grafito puro como moderadores de los neutrones producidos por uranio, de procedencia natural pero de alta calidad. La «pila» de Chicago conocida como CP-1 consumió 385 toneladas de grafito, 6 de uranio metálico puro y 34 toneladas de óxido de uranio. El nivel crítico, donde el factor multiplicativo pasa a ser mayor que uno, se obtuvo rápidamente y sin mayores problemas el 2 de diciembre de 1942. Fermi estaba entusiasmado, no sólo por el éxito del trabajo, sino porque la pila fuera tan fácil de controlar con las barras de cadmio para absorber neutrones. «Operar una pila es tan sencillo como mantener un automóvil rodando sobre una carretera recta, ajustando el volante cuando el auto tiende a irse hacia la derecha o la izquierda», escribió. El hecho de que este primer caso de energía nuclear controlable produjera una minúscula cantidad de energía era irrelevante, ya que su propósito no era producir calor o electricidad. CP-1 se construyó como prototipo de un generador de plutonio. Su éxito hizo que el OSRD tuviera confianza en que se podría producir una bomba atómica a tiempo para que se pudiera utilizar en la guerra, e implicaba la necesidad de otra ampliación del proyecto. A finales de diciembre de 1942, Roosevelt aprobó el plan de Bush para utilizar 250 millones de dólares en fábricas productoras de uranio-235 y plutonio. No estaba claro cuánto plutonio se podría producir y cómo de rápido, y por este motivo se decidió proseguir con los dos tipos de materiales de fisión. El problema más formidable con la bomba de uranio consistía en la separación de uranio-235 a partir de uranio natural. Se consideraron varios métodos, y se llegó a la conclusión de que el más práctico era el método de difusión gaseosa, en el cual se hace fluir hexafluoruro de uranio en estado gaseoso a través de un sistema de barreras porosas. Otra posibilidad, propuesta por Lawrence, era la separación electromagnética mediante enormes electroimanes o

«calutrones», siendo este método aprobado también. En 1944, se suplieron las plantas que utilizaban estos dos métodos con una planta de difusión térmica. Los tres métodos se integraron en el enorme sistema industrial construido en Oak Ridge, Tennessee, que comenzó la producción de uranio-235 en abril de 1945. Oak Ridge incluía un reactor de uranio piloto, pero los tres grandes reactores refrigerados por agua que producirían material para la bomba de uranio se construyeron en Hanford, Washington.

El diseño de la bomba atómica era tarea del numeroso grupo de físicos que se empezó a formar en Los Álamos, Nuevo México, en la primavera de 1943. Con J. Robert Oppenheimer como director del laboratorio, se establecieron siete divisiones, entre ellas una división teórica dirigida por Bethe, una experimental por Robert Wilson, una de física de bombas por Robert Bacher y una de explosivos por George Kistiakowsky. Oppenheimer nunca se había ocupado de la investigación del uranio previamente y algunos grupos militares le consideraban un riesgo para la seguridad, debido a sus flirteos ocasionales con el comunismo algunos años antes. Pero Groves tenía confianza en las habilidades de Oppenheimer como líder, y su intuición se demostró correcta. Oppenheimer, respetado tanto por los físicos como por los generales del ejército, era justamente el hombre adecuado para una tarea imposible. A los físicos que llegaban a Los Álamos se les proporcionaban los fundamentos técnicos necesarios en un curso de cinco clases sobre «Cómo construir una bomba atómica» impartido por Robert Seber, un teórico y colega de Oppenheimer. Por si acaso alguien no lo sabía ya, Serber empezaba el curso señalando, «el objeto del proyecto es producir un *arma militar práctica* en forma de bomba en la cual la energía se libere por una rápida reacción neutrónica en cadena en uno o más de los materiales en los que se ha detectado fisión nuclear» (Serber 1992, p. 3). En una bomba atómica los neutrones deberían ser rápidos, no lentos como en un reactor, y no se sabía si de hecho podía ocurrir una reacción en cadena con neutrones rápidos. Los primeros experimentos en Los Álamos probaron que sí, e indicaron el tamaño crítico de la bomba.

Otro de los importantes problemas estudiados por los físicos en el desierto de Nuevo México era cómo acumular una masa crítica de material fisionable a partir de dos masas subcríticas. Uno de los métodos, una versión más sofisticada de la que se incluía en el memorando de Frisch y Peierls, era disparar una de las masas subcríticas hacia la otra. Otro método fue propuesto por Seth Neddermeyer: rodear una masa esférica subcrítica con un explosivo químico y luego «implotarla» para hacerla mucho más pequeña y densa; aunque tuviera la misma masa, su densidad más elevada la haría supercrítica. El método de implosión no se había medido y era mucho más complejo que el del disparo, pero resultó que para la bomba de plutonio sólo se podía utilizar la implosión. Los físicos descubrieron que el plutonio-240, que aparece inevitablemente con el plutonio-239 ordinario, experimentaría una fisión espontánea y como resultado produciría demasiados neutrones para que el método del disparo funcionara. (La fisión espontánea en el uranio había sido descubierta por dos físicos soviéticos, Georgii Flerov y Konstantin Petrzhak, y publicado en *Physical Review* en 1940.) En vez de apoyarse en un tipo particular de bomba, una bomba de plutonio por implosión o una de

uranio por disparo, se decidió desarrollar los dos tipos a la vez. La etapa final del proyecto de la bomba tuvo lugar en el verano de 1945, tras la rendición incondicional de Alemania y el final de la guerra en Europa. Se había planeado utilizar la bomba contra el Tercer Reich, pero la nueva situación no alteró nada la marcha del Proyecto Manhattan. Todavía quedaban los japoneses y la inercia del gigantesco proyecto parecía incontrolable.

¿Quiénes eran los físicos que trabajaban en el Proyecto Manhattan? Sería quizá más fácil dar la lista de los que no estaban, ya que el proyecto incluía a la mayoría de los físicos más brillantes del mundo occidental, desde figuras legendarias como Bohr a jóvenes físicos prometedores como Richard Feynman. Los dos extremos eran igualmente valiosos para el proyecto. Sobre Bohr, oficialmente «doctor Baker», Oppenheimer informó a Groves a principios de 1944 que «el doctor Baker se ocupa principalmente de la correlación e interpretación de muchos datos nuevos sobre fisión nuclear y temas relacionados [...] [pero] muy poco de los problemas de ingeniería de nuestro programa aunque es por supuesto consciente de su importancia y su dificultad». Sobre Feynman, Oppenheimer escribió más adelante en 1944 que «[es] no sólo un teórico extremadamente brillante, sino un hombre de la mayor robustez, responsabilidad y calidez, un profesor brillante y lúcido, y un trabajador infatigable» (Smith y Weiner 1980, pp. 270 y 276).

Una gran parte de los investigadores más activos del Proyecto Manhattan eran físicos que habían residido en Europa tan sólo unos pocos años antes. Un vistazo a la tabla 17.2 proporciona muchas de las figuras centrales en el proyecto de la bomba. Una de ellas era James Franck, el premio Nobel alemán de 1925, que había abandonado el país en 1935 y ahora trabajaba en Chicago. Era uno de los pocos científicos que trabajaba en el proyecto de la bomba que alertó sobre sus consecuencias políticas y éticas en una primera etapa. El 11 de junio de 1945, antes de la explosión de la primera bomba atómica, escribió junto con seis de sus colegas de Chicago un informe al secretario de Guerra en el cual explicaban su postura. «A los científicos se nos ha acusado en numerosas ocasiones de proporcionar nuevas armas para la destrucción mutua de las naciones, en vez de mejorar su bienestar», escribió Franck. «Nos sentimos obligados a asumir una postura más activa ahora porque el éxito que hemos conseguido en la evolución de la energía nuclear está plagado de peligros infinitamente mayores que los de todas las invenciones del pasado». Haciéndose eco de muchos de los argumentos de Bohr, Franck miraba hacia el futuro y alertaba sobre una carrera armamentística nuclear, ya que «las bombas nucleares no pueden posiblemente seguir siendo un "arma secreta" al servicio exclusivo de este país durante más de unos pocos años». Más específicamente, el informe de Franck aconsejaba que la bomba de Estados Unidos se «revelara al mundo por primera vez mediante una demostración en un área deshabitada seleccionada apropiadamente» (Graetzer y Anderson 1971, p. 104). Pero esto no fue lo que sucedió. Franck y su pequeño grupo no despertaban simpatías entre los líderes militares y su preocupada actitud estaba lejos de ser compartida por la mayoría de los físicos que trabajaban en el Proyecto Manhattan. La mayoría no tenían objeciones morales en trabajar en un arma de destrucción masiva. Algunos rechazaron el trabajo,

pero la actitud general era que estaba justificado en vista de la situación de guerra y la posibilidad de que Hitler pudiera conseguir la bomba antes. Además, muchos de los físicos estaban simplemente «intrigados con un problema científico y de ingeniería fascinante y difícil», como recordaba David Anderson unos cuarenta años después (Badash, Hodes y Tiddens 1986, p. 222).

La muerte de dos ciudades

«La impresión más sorprendente fue la de una luz increíblemente brillante [...] Quedé anonadado por el nuevo espectáculo. Vimos el cielo entero brillar con un increíble destello a pesar de las gafas muy oscuras que llevábamos [...] Por un momento creí que la explosión podría incinerar la atmósfera y acabar así con la tierra, aunque era consciente de que esto no era posible» (Rhodes 1986, p. 673). Ésta era la impresión de Emilio Segré al ser testigo de la primera explosión nuclear de la historia, la prueba denominada «Trinity» en el desierto de Alamogordo el 16 de julio de 1945, a las 5:30 a.m. La bomba, colocada al final de una torre de acero de 30 metros, era del tipo de implosión de plutonio. La prueba fue un completo éxito, con una energía correspondiente a unos 18 kilotones de dinamita, que era más de lo que esperaban la mayoría de los físicos. Esto, y no las preocupaciones de Franck, era lo que importaba a los físicos que observaron el espectacular fenómeno. «Naturalmente, estábamos rebosantes de alegría con el resultado del experimento», recordaba Victor Weisskopf. «Nos dirigimos el uno al otro e intercambiamos enhorabuenas, durante los primeros minutos. Después, sentimos un escalofrío, que no era debido al frío matutino [...]» (*ibid.*, p. 675). La bomba de plutonio funcionó perfectamente y había material suficiente para la bomba de uranio, que se comprendía en más profundidad y no precisaba por tanto una prueba. Había llegado el momento de la acción verdadera, y ello, de hecho, implicaba la destrucción de ciudades japonesas. Hasta entonces, el desarrollo de la bomba se había dejado en manos de los físicos, cuyas voces eran también importantes en las discusiones políticas y militares. Pero fueron los líderes políticos y militares, por supuesto, los que decidieron para qué se utilizarían las bombas. Había muchas discusiones entre los físicos en Los Álamos, Berkeley, Chicago y otros sitios, pero no formaron un frente unido y, en general, no se inclinaban a mostrarse en desacuerdo con los líderes militares. El grupo asesor científico, que consistía en Compton, Fermi, Lawrence y Oppenheimer, no veía alternativa aceptable a hacer que las bombas explotaran sobre áreas de alta densidad de población en Japón. En todo caso, Truman, el nuevo presidente, decidió que las bombas deberían tirarse sobre Japón lo antes posible y según el juicio de los generales. Esta decisión ha dado lugar a interminables discusiones, pero lo importante es que fue tomada. En esta etapa, a principios de julio, los físicos no tenían mucho que decir sobre las criaturas que habían construido.

La primera criatura era «Little Boy», una bomba de uranio de 4.500 kg, que medía 71 cm de diámetro por 3 metros de largo. Transportada por el bombardero B-29 *Enola Gay*, se hizo explotar sobre la ciudad de Hiroshima el 6 de agosto de 1945 a las 8:16

TABLA 18.1
Datos sobre las dos bombas nucleares y sus consecuencias

	Hiroshima	*Nagasaki*
Tipo de bomba	uranio-disparo	plutonio-implosión
Peso de la bomba (toneladas)	4	4,5
Energía de explosión (kilotoneladas de dinamita)	12,5	22
Población	285.000	270.000
Total de edificios destruidos	54.000	14.000
Muertos en la fase inicial	105.000	65.000
Heridos	75.000	40.000
Área totalmente destruida (km^2)	13	6,7
Muertos por km^2	8.100	9.700

Nota: Basado en cifras dadas en *The Impact of the A-Bomb* (Tokio: Iwanami Shoten, 1985).

a.m., hora local, a unos 600 metros sobre el suelo. Llevó a cabo la tarea para la que se había construido, excepto que no forzó a los japoneses a aceptar la orden de rendición incondicional. Tres días después, «Fat Man» tomó el testigo. Liberada sobre Nagasaki desde otro B-29 (llamado *Bock's Car*), la bomba de plutonio explotó a las 11:02 a.m., a la misma altura sobre el suelo, aproximadamente. También cumplió con su cometido (véase tabla 18.1), y cinco días después el gobierno japonés y su emperador capitularon. Era el final de la Segunda Guerra Mundial.

El proyecto de la bomba, de dos mil millones de dólares, fue el mayor proyecto de investigación de la historia, involucrando más científicos y dinero que cualquier otro proyecto anterior o posterior. Para casi todo el mundo, demostró drásticamente que la ciencia, y la física en particular, era capaz de ganar guerras y cambiar el curso de la historia. En realidad, el Proyecto Manhattan se completó demasiado tarde para que fuera de importancia decisiva en lo tocante a la guerra. La verdadera implicación de la bomba atómica era más política que militar, y esto se hizo evidente sólo después del final de la guerra. Desde un punto de vista militar, la investigación sobre el radar, la otra área principal de la física militar aliada (que recibió mucha menos publicidad) fue mucho más importante.

Sólo el titánico proyecto estadounidense consiguió desarrollar una bomba atómica, pero se emprendió la investigación con fines militares en otros países también. En Japón, la Marina creó un programa de uranio con el propósito de desarrollar un reactor nuclear para propulsar naves de guerra, pero el proyecto se retiró porque parecía demasiado costoso e incierto. En la Universidad de Tokio, un grupo dirigido por Nishina exploró la posibilidad de separar uranio-235 para construir una bomba, pero el progreso fue lento. En la Unión Soviética, se creó una Comisión sobre el Problema del Uranio en agosto de 1940 en la Academia de las Ciencias. La tarea del comité era estudiar la posibilidad de utilizar la energía de una reacción en cadena en el uranio. Los

principales físicos soviéticos que trabajaban en la comisión, Iulii Khariton, Igor Zel'dovich, Flerov e Igor Kurchatov, duplicaron independientemente el trabajo de Frisch y Peierls en Inglaterra. A principios de 1941, calcularon la masa crítica de uranio-235 y hallaron que estaba en torno a los 10 kilogramos. Incluso incluyeron en sus cálculos un reflector de neutrones pesados. Algo después, Kurchatov se percató de la importancia del plutonio y enfatizó que la mejor manera de construir una bomba podría ser utilizando el nuevo elemento. El equivalente ruso de Los Álamos, aunque mucho menor, era el «Laboratorio N.º 2», establecido por Kurchatov en la primavera de 1943. Un año después, incluía setenta y cuatro personas, de las cuales veinticinco eran científicos (en Los Álamos trabajaban unas 2.000 personas). El proyecto de bomba soviético se vio seriamente obstaculizado por la carencia de materiales, especialmente uranio puro y grafito. Por otra parte, los rusos tenían la ventaja de estar informados sobre el proyecto secreto estadounidense gracias a Fuchs, el físico refugiado alemán que trabajaba en Los Álamos. Sin embargo, en agosto de 1945 los rusos estaban muy lejos de tener una bomba atómica. Obtuvieron sus primeros microgramos de plutonio en agosto de 1944, a partir del ciclotrón de Leningrado, y el primer reactor soviético (llamado F-1) llegó al estado crítico en los últimos días de 1946.

La iniciativa alemana, tan temida por los físicos de Gran Bretaña y Estados Unidos, comenzó pronto. Ya en la primavera de 1939 –justo después del anuncio de París sobre neutrones secundarios– los físicos alemanes señalaron las potenciales aplicaciones militares de la física del uranio y la Uranverein (Sociedad del Uranio) comenzó una serie de reuniones. El grupo incluía a Flügge, Paul Harteck, Fritz Bopp, Heisenberg, Von Weizsäcker y Walther Gehrlach, entre otros. Se formaron varios equipos de investigación nuclear, en la Universidad de Leipzig, la Universidad de Hamburgo, el Instituto de Física Kaiser Wilhelm en Berlín, y en otros sitios. El propósito general de la Uranverein era estudiar la posibilidad de utilizar energía nuclear, principalmente en forma de un reactor que pudiera utilizarse para propulsar submarinos o incluso aeroplanos. Las bombas atómicas estaban en la agenda inicialmente, pero no se les dio una alta prioridad. Sin embargo, los físicos eran muy conscientes de la posibilidad de una bomba. En una comunicación en febrero de 1942, Heisenberg mencionó que el aislamiento del uranio-235 podría «llevar a un explosivo de inimaginable potencia» y que una máquina de uranio «puede también llevar a la producción de un explosivo increíblemente potente» (Hentschel 1996, p. 300). Durante los primeros dos años de la guerra, la investigación del uranio en Alemania estaba al mismo nivel que en Inglaterra o Estados Unidos, pero tras 1942 el progreso declinó y los militares perdieron algo de interés en el proyecto. Desconocedor del progreso que tenía lugar en Estados Unidos, Heisenberg y sus colegas investigadores del uranio se concentraron en producir un reactor. Cuando la guerra terminó y Heisenberg fue hecho preso, la primitiva máquina todavía no había operado al nivel crítico. Heisenberg, Hahn y los otros físicos alemanes internos en Farm Hall en Inglaterra quedaron muy sorprendidos cuando supieron del lanzamiento de «Little Boy» sobre Hiroshima.

Uno puede llevarse fácilmente la impresión de que toda la comunidad física estaba ocupada por la ciencia militar durante los años de guerra y que no tenían tiempo ni

TABLA 18.2
Número de artículos sobre física, en todas las revistas, y páginas en los volúmenes de *Physical Review* y *Philosophical Magazine*

Año	*1938*	*1939*	*1940*	*1941*	*1942*	*1943*	*1944*	*1945*	*1946*	*1947*	*1948*	*1949*
Artículos	5.081	4.705	3.230	2.737	3.152	2.968	2.687	3.148	3.273	3.765	4.088	7.500
Phys. Rev.	2.965	2.914	1.677	1.041	1.008	428	417	945	1.517	2.240	2.307	2.275
Phil. Mag.	2.237	1.478	1.130	1.026	910	851	855	875	884	913	1008	1278

apetito para la ciencia pura. Sin embargo, esto estaría lejos de ser cierto. Aunque la cantidad de física académica ordinaria se redujo mucho entre 1940 y 1945, todavía existían físicos trabajando en áreas de la física pura y produciendo una cantidad sustanciosa de artículos en esta categoría. Dirac rehusó formar parte del Proyecto Manhattan y continuó trabajando en problemas de electrodinámica cuántica (aunque también trabajó en asuntos relacionados con el proyecto de bomba británico). Born se mantuvo alejado de la física militar. «Continúo con mi trabajo tranquilo», escribió a Einstein en la

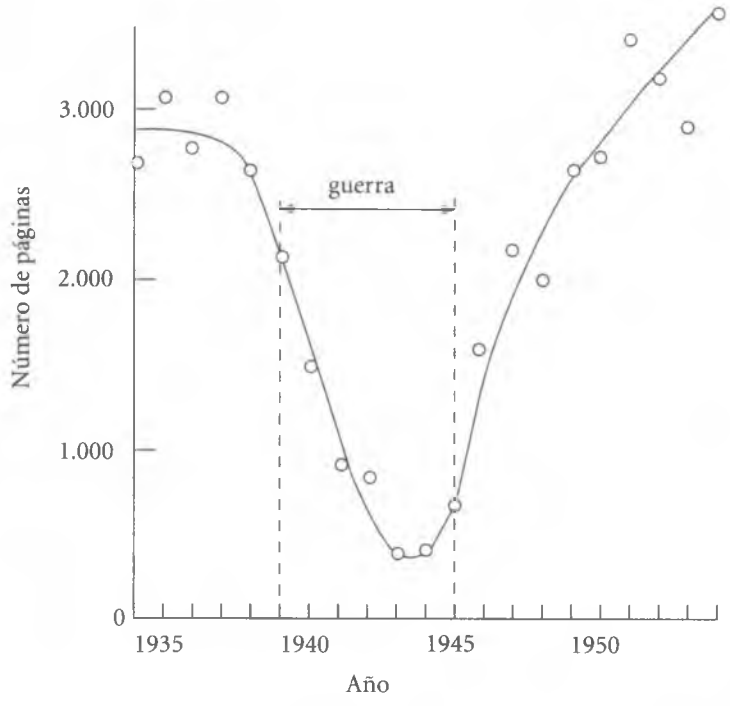


Gráfico 18.1. El número de páginas publicadas en cada año natural en *Proceedings of the Royal Society of London*, sección A. Se han complementado los cambios en el área impresa de cada página al normalizarlas al formato usado en 1955. *Fuente:* E. Bullard, «El efecto de la Segunda Guerra Mundial en el desarrollo del conocimiento en las ciencias físicas», *Proceedings of the Royal Society A* 342 (1975), pp. 519-536. Reelaborado con permiso de The Royal Society.

primavera de 1940. «Pronto mi departamento [en Edimburgo] será el único sitio de Gran Bretaña donde todavía se lleve a cabo trabajo teórico» (Kragh 1990, p. 159). En el nuevo Instituto de Estudios Avanzados de Dublín en la neutral Irlanda, Schrödinger impartió lecciones y organizó coloquios sobre asuntos teóricos, con participantes que incluían a Heitler, Dirac, Eddington y Born. Hasta Heisenberg, que trabajaba duro en la máquina de uranio, encontró tiempo para concentrarse en la teoría pura. El último artículo que apareció en *Zeitschrift für Physik* antes del final de la guerra fue la tercera parte de «Las magnitudes observables en la teoría de las partículas elementales», de Heisenberg, un artículo tan alejado de las aplicaciones militares como se pueda imaginar. Se envió el 12 de mayo de 1944. Teóricos japoneses, incluyendo a Tomonaga y Sakata, trabajaron similarmente en problemas fundamentales durante la guerra. El importante trabajo de Tomonaga «Sobre una reformulación relativista de la teoría cuántica de campos» apareció (en japonés) en 1943.

Esto no significa negar que la guerra tuviera un muy serio impacto en la física academica, tanto cuantitativa como cualitativamente. La física mundial sobrevivió en 1944, pero a un bajo nivel. La disminución de publicaciones físicas y la lenta recuperación tras la paz quedan ilustrados por el número de artículos cuyos resúmenes aparecieron en *Physics Abstracts* y el número de páginas en dos revistas de física principales (tabla 18.2). El declive se muestra en los gráficos 18.1 y 18.2, que se refieren a la situación en Gran Bretaña.

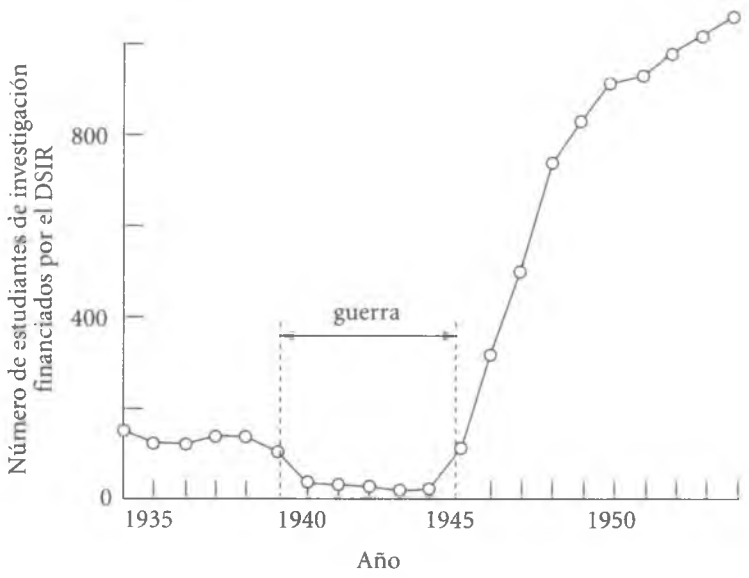


Gráfico 18.2. Número total de estudiantes de investigación, la mayoría en ciencias físicas, financiados por el DSIR (Department of Scientific and Industrial Research) cada año. *Fuente:* E. Bullard, *Proceedings of the Royal Society A* 342 (1975), pp. 519-536. Reelaborado con permiso de The Royal Society.

Tercera parte:
progreso y problemas

CAPÍTULO 19

Temas nucleares

Física del núcleo atómico

La física nuclear había avanzado notablemente a finales de los años treinta y su valía quedó probada al proporcionar el cimiento a la increíble energía nuclear basada en el uranio. Tras la guerra, cuando la física fue volviendo a las universidades y gran parte del trabajo emprendido entre 1941 y 1945 fue desclasificado, el joven campo de la física nuclear experimentó un tremendo crecimiento. Generosamente financiado con dinero federal, se convirtió en quizá el más prestigioso campo de la física y el que atrajo a muchos de los estudiantes más brillantes.

Los fundamentos de la teoría nuclear se habían establecido antes de la guerra, gracias al trabajo de físicos como Bethe, Bohr, Wheeler, Wigner y Von Weizsäcker. Pero el impresionante progreso era sobre todo fenomenológico, y se conocía muy poco de las fuerzas que mantenían a protones y neutrones tan fuertemente unidos en el núcleo. Se creía generalmente que la teoría de Yukawa, sobre mesones intercambiándose entre los nucleones, era el mejor esfuerzo de explicar satisfactoriamente las fuerzas nucleares. Durante la guerra, y poco después, Pauli, Rosenfeld, Møller y algunos otros teóricos se esforzaron en desarrollar una teoría mesónica de las fuerzas nucleares, pero sus complicados cálculos fracasaron a la hora de explicar satisfactoriamente la fuerza fuerte. Dos principales causas del fracaso fueron que se sabía muy poco sobre el mesón de Yukawa (pión) y su interacción con los nucleones, y también que las teorías suponían la existencia de sólo un tipo de mesón. Por supuesto, tampoco ayudó el hecho de que se creyera que el cuanto de Yukawa fuera el mesón ligero que se conocía en la radiación cósmica. Incluso con el nuevo mesón de 1947, que se desintegraba rápidamente, el problema de explicar las fuerzas nucleares resultó ser extremadamente difícil. Se resolvió parcialmente tan sólo a principios de los sesenta, con el descubrimiento de nuevos tipos de mesones con vidas cortas. En su *Teoría nuclear elemental* de 1947, Bethe escribió que la teoría mesónica «hasta ahora no ha proporcionado ningún resultado en

acuerdo cuantitativo con los datos empíricos sobre fuerzas nucleares», y que «en este momento no existen resultados fiables sobre la teoría mesónica de las fuerzas nucleares». Ocho años después, en un volumen celebrando el septuagésimo cumpleaños de Bohr, Landau concluía que «no se pueden construir teorías mesónicas sin profundos cambios en los principios básicos de la física moderna». Sin embargo, el fracaso no era total y, en cualquier caso, no impidió que los físicos exploraran la estructura del núcleo, independientemente de lo que lo mantuviera.

El modelo favorito de finales de los años treinta, y sobre el que se basó la comprensión del proceso de fisión, era el modelo de gota líquida, desarrollado en particular por Bohr y Wheeler. Según este modelo, los núcleos son gotitas casi incomprimibles de densidad extremadamente elevada, con los nucleones ligados a otros fuerte y colectivamente, de manera similar a las moléculas en una gota de agua. El modelo consiguió un gran éxito, pero existían en todo caso numerosos hechos experimentales que no era capaz de explicar. Por ejemplo, el modelo de gota líquida no podía explicar los estados excitados hallados en los espectros de la energía nuclear. En 1949 afrontó el desafío del modelo de capas cuyas raíces, como las del modelo de gota líquida, se remontaban a los años treinta. Ya en 1933, el físico alemán Walter Elsasser, tomando una sugerencia proporcionada el año anterior por el estadounidense T. Barlett, había propuesto que los nucleones podrían ocupar niveles cuánticos en analogía con los electrones atómicos. De este modo, podría explicar varias regularidades en las abundancias de los elementos químicos y las energías de ligadura de sus núcleos. La idea de Elsasser de «capas» nucleares era bien conocida, pero carecía de justificación teórica; además, no podía reproducir las capas cerradas para los números neutrónicos 82 y 126 que los datos empíricos sugerían. Por esta razón, se insinuaba que podría ser «numerología» y, dado que contradecía las ideas de Bohr sobre la estructura nuclear, era despreciada por la mayoría de los físicos, que preferían trabajar con el modelo de gota líquida, que tenía éxito empíricamente.

La realidad de algún tipo de disposición en capas quedó clara sólo en 1948, cuando Maria Goeppert Mayer agrupó evidencias de distintos campos que mostraban la realidad de lo que pronto empezó a conocerse como «números mágicos». El nombre parece haber sido acuñado por Wigner. La física alemana, nacida en Polonia, Mayer (de apellido de soltera, Goeppert) había estudiado en Gotinga bajo la dirección de Born, y en 1930 emigró a Estados Unidos. En 1946 Mayer se mudó a Chicago, donde trabajó con Fermi y Teller y obtuvo una plaza a tiempo parcial en el nuevo Laboratorio Nacional de Argonne. Fue sólo entonces cuando se percató de las sorprendentes regularidades asociadas con ciertos números nucleares y cuando leyó el artículo de Elsasser de 1933. Mayer sostuvo persuasivamente que los núcleos con 2, 8, 20, 50, 82 y 126 protones o neutrones eran particularmente estables y que por tanto estos números mágicos representaban capas cerradas en el núcleo. Estos núcleos no sólo tenían energías de ligadura elevadas y mayor número de isótopos, sino que eran también marcadamente más abundantes que los núcleos colindantes. Los datos sobre abundancia cósmica de elementos que el geoquímico suizo-noruego Victor Goldschmidt agrupó pacientemen-

te durante los años treinta se utilizaron para conseguir información tanto sobre el microcosmos como sobre el macrocosmos; estos datos proporcionaron evidencia sobre la estructura del núcleo atómico y fueron de crucial importancia para el nuevo modelo universal del «big bang», debido a Gamow. De hecho, Mayer llegó a su teoría nuclear de capas mediante un intento fallido de entender cómo se formaron cosmológicamente los elementos. Una revisión de la explicación de Elsesser sobre los números mágicos en términos de un modelo de capas fue propuesta 1949, de manera independiente por Mayer y por los físicos alemanes Hans Jensen y sus colaboradores Otto Haxel y Hans Suess. Jensen había estado interesado en los números mágicos nucleares durante algunos años, y durante la guerra había discutido el asunto con Goldschmidt en Oslo. En 1948 discutió sobre ello con Bohr quien, a pesar de su interés propio en el modelo de la gota líquida, animó a Jensen a que desarrollara su idea. Sin embargo, como Jenses recordó en su discurso del Nobel, cuando mandó su artículo compartido con Haxel y Suess a «una revista seria», fue rechazado porque «no es física en realidad, sino jugar con los números». Sólo cuando envió el artículo a *Physical Review*, a través de Weisskopf, fue aceptado.

Introduciendo un fuerte acoplamiento entre el momento orbital y el momento de espín de cada nucleón, Mayer y Jensen pudieron explicar una amplia gama de datos relacionados con los números mágicos. Los núcleos particularmente estables eran aquellos con órbitas cerradas y un momento angular total nulo. Los estados excitados se debían a «nucleones de valencia» que se movían en órbitas superiores. Al contrario del modelo de la gota líquida, el modelo de capas suponía que cada nucleón se movía independientemente de los demás en el campo nuclear, en órbitas casi imperturbadas. Por este motivo, el modelo de capas simple se conocía también como un modelo de partículas independientes. La potencia explicativa y predictiva de la teoría indicaba fuertemente que era al menos parcialmente correcto, y fue rápidamente aceptado y desarrollado por otros físicos nucleares. El hecho de que el origen del necesario acoplamiento fuerte entre espín y órbita fuera bastante misterioso importaba menos. En 1963, la importancia del modelo de capas fue reconocida por el comité del Nobel, que otorgó medio premio de Física conjuntamente a Mayer y Jensen. (La otra mitad se otorgó a Eugene Wigner.) Ésta fue sólo la segunda vez, y hasta ahora la última, en la que una mujer ganó el premio.

Sobre 1950 había por tanto dos teorías principales del núcleo: el modelo de gota líquida y el modelo de capas. Ambos tuvieron éxito, pero el éxito fue limitado, ya que fracasaban a la hora de explicar ciertos datos experimentales. Incluso cuando se eliminaban varias suposiciones que hacían el cálculo más simple, y los modelos se desarrollaban en versiones más sofisticadas, había aspectos que ninguna de las teorías podía explicar. Además, es obvio que los dos modelos se contradecían mutuamente: uno veía el núcleo como un sistema colectivo, el otro consideraba los nucleones partículas independientes. Ésta era una situación clásica en la historia de la física y la respuesta estaba, como en muchas situaciones similares, en considerar los dos modelos casos extremos de un modelo más general. En este caso, sería un modelo que incluiría a la gota

líquida además de aspectos de partículas independientes. James Rainwater de la Universidad de Columbia se dio cuenta en 1950 de que la evidencia de los momentos cuadrupolares eléctricos nucleares estaba en desacuerdo con el modelo de capas en el grupo de tierras raras; esto le llevó a sugerir que la forma del núcleo no era esférica, sino distorsionada en un esferoide. Aproximadamente al mismo tiempo, Aage Bohr (el hijo de Niels Bohr) y el físico estadounidense-danés Ben Mottelson empezaron a desarrollar un modelo basado en núcleos en rotación con forma esferoidal en el cual las oscilaciones superficiales (un aspecto de gota líquida) se combinaban con excitaciones de partículas aisladas (un aspecto del modelo de capas). Durante 1950-1953, Bohr y Mottelson desarrollaron su modelo del núcleo, conocido como el modelo colectivo o rotacional. La principal característica de esta imagen del núcleo era el movimiento rotacional del núcleo, que se deformaba y se acoplaba con los estados de una sola partícula. Por aquel entonces, la física nuclear estaba fuertemente dominada por Estados Unidos, pero la mayor parte del trabajo de Bohr y Mottelson tuvo lugar en el instituto de Niels Bohr en Copenhague, donde un grupo de físicos nucleares desarrolló el modelo colectivo durante los años cincuenta. Una de las maneras en la que los físicos de Copenhague consiguieron valiosa información sobre la estructura del núcleo fue mediante la excitación de Coulomb, es decir, excitación del núcleo atómico mediante bombardeo con partículas cargadas de baja energía que no podían alterar el núcleo, sino sólo actuar sobre él electromagnéticamente. De esta manera, y también de otras, el grupo de Copenhague investigó sistemáticamente los estados energéticos rotacionales y utilizaron los datos para confirmar y refinar el modelo colectivo. Rainwater, Bohr y Mottelson compartieron el premio Nobel de 1975 por «su trabajo en la estructura interna del núcleo atómico». Ése fue hasta ahora el último premio otorgado a trabajos en física nuclear, reflejando el hecho de que la era clásica de este campo de la física llegó a su cima alrededor de 1960.

Otro premio Nobel que también se otorgó por una contribución al entendimiento de la estructura del núcleo fue el del estadounidense Robert Hofstadter, quien investigó los detalles del núcleo mediante experimentos de esparcimiento de electrones. En principio, este método era análogo a los experimentos clásicos de esparcimiento alfa de Geiger y Marsden que llevaron en 1911 al modelo atómico nuclear de Rutherford. El bombardeo del núcleo con electrones rápidos tenía la ventaja de que se podían ignorar los efectos de las fuerzas nucleares, que no se entendían bien. Hofstadter empezó a utilizar el nuevo acelerador lineal de la Universidad de Stanford en 1953, para estudiar el esparcimiento de electrones de 116 MeV por metales; tres años después, consiguió utilizar electrones con energías de 550 MeV. Examinó los electrones esparcidos mediante un espectrómetro enorme, especialmente diseñado, y a partir de los datos dedujo cómo variaba la densidad de carga del núcleo en función de la distancia al centro. Animado por sus resultados, Hofstadter aplicó en 1954 el método al hidrógeno para hallar la distribución de carga en un protón y también al deuterio, para examinar la estructura del deuterón y el neutrón. Los experimentos de Stanford eran por tanto de interés no sólo para la física nuclear sino para la física de partículas elementales. Los

resultados mostraban lo que se suponía desde hacía tiempo: que el protón y el neutrón son distintos aspectos de la misma partícula; y, además, que esta partícula, el nucleón, es un objeto de tamaño finito, aunque sin contornos precisos. Al contrario de los núcleos pesados, que tienen un radio bien definido, se halló que la densidad de carga de los nucleones decrecía suavemente a partir del centro. Se encontró un radio promedio, definido como la raíz cuadrada del promedio del radio al cuadrado, de unos $0{,}74 \times 10^{-15}$ m. Hofstadter se imaginaba a los nucleones rodeados de nubes de mesones, con las nubes sumándose en el caso del protón y cancelándose en el neutrón. Sus experimentos mostraron, como dijo al final de su discurso del Nobel en 1961, que «se ha encontrado ahora que el protón y el neutrón, antes considerados partículas elementales, son cuerpos altamente complejos».

Alquimia moderna

La creencia de Fermi en 1934 de que había producido nuevos elementos químicos más pesados que el uranio resultó no ser válida, pero siete años después, los elementos con números 93 y 94 se habían convertido en una realidad. Esto fue sólo el principio, aunque tuvo una importancia crucial. Con el descubrimiento del neptunio y el plutonio, se abrió un nuevo campo de la física y la química, la manufactura y la ciencia de los elementos transuránicos. El reconocido maestro de este campo fue Glenn Seaborg, que emergería más adelante como un importante abogado de la energía nuclear y sería nombrado en 1961 presidente de la Comisión de la Energía Atómica. Ya en 1944, se descubrieron los elementos de números 95 y 96 en el grupo de Seaborg en el Laboratorio Metalúrgico de la Universidad de Chicago, y denominados americio y curio, respectivamente. Mientras que el americio se identificó como un producto de la desintegración del plutonio-241, el curio se produjo bombardeando plutonio-239 con partículas alfa en el ciclotrón de Berkeley. Después de la guerra llegaron los elementos con números atómicos entre el 97 y el 101, llamados berkelio, californio, einstenio, fermio y mendelevio (véase tabla 19.1). De éstos, los dos primeros y el último se manufacturaron «normalmente», con partículas alfa aceleradas en un ciclotrón. El einstenio y el fermio, por otro lado, se identificaron por primera vez en los residuos recogidos tras la explosión termonuclear de prueba en noviembre de 1952 en el atolón Eniwetok. Los científicos que examinaban los residuos en Argonne, Los Álamos y Berkeley concluyeron que los isótopos se habían producido como resultado de captura neutrónica en el intenso flujo producido en la explosión. Durante su trabajo manufacturando e identificando nuevos elementos, los científicos de Berkeley se hicieron expertos en técnicas microanalíticas y aprendieron a operar con lo que, por esa época, se consideraban cantidades de materia increíblemente pequeñas. Por ejemplo, la identificación del californio se realizó con un total de 5.000 átomos. Incluso este número era grande comparado con la producción del mendelevio, que tuvo lugar (probablemente por primera vez en la historia de la química) con una cantidad no medida del elemento objetivo, einstenio-253.

TABLA 19.1
Descubrimiento de los elementos transuránicos, 1941-1961

Z	*Nombre*	*Símbolo*	*Año*	*Localidad*	*Descubridores*
93	neptunio	Np	1940	Berkeley	E. McMillan, P. Abelson
94	plutonio	Pu			G. Seaborg, E. Mc Millan
			1941	Berkeley	J. Kennedy, A. Wahl
95	americio	Am			G. Seaborg, R. James,
			1944	Chicago	L. Morgan, A. Ghiorso,
96	curio	Cm			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1944	Chicago	R. James
97	berkelio	Bk			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1949	Berkeley	S. Thompson
98	californio	Cf			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1950	Berkeley	S. Thompson, K. Street
99	einstenio	Es			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1955	Berkeley etc.	*et al.*
100	fermio	Fm			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1955	Berkeley etc.	*et al.*
101	mendelevio	Md			G. Seaborg, A. Ghiorso,
			1955	Berkeley	*et al.*
102	nobelio	No	1957	Estocolmo	H. Atterling *et al.*
103	laurencio	Lw	1961	Berkeley	A. Ghiorso *et al.*

Nota: Los datos no deberían tomarse demasiado literalmente. Los descubrimientos de los elementos químicos, incluso si están manufacturados, son eventos complejos que no pueden reducirse fácilmente a datos o nombres correctos.

Hasta el elemento 101 incluido, el juego de los descubrimientos estaba completamente dominado por los físicos y químicos estadounidenses –californianos, para ser precisos– liderados por Seaborg. Los procesos de manufactura estaban basados sobre todo en el bombardeo con partículas alfa. Pero los californianos no jugaban solos. Por ejemplo, el físico sueco Hugo Atterling y sus colaboradores utilizaron el ciclotrón del Instituto Nobel de Física para bombardear uranio-238 con iones acelerados de oxígeno. En competición con los estadounidenses, dieron a conocer la producción del elemento 100 a principios de 1954. Tres años después, en julio de 1957, un grupo de físicos estadounidenses, suecos y británicos utilizó el ciclotrón de Estocolmo para producir un fuerte haz de iones de carbono-13 ($^{13}C^{4+}$) y lo hicieron reaccionar con una muestra de curio-244. Anunciaron el descubrimiento del elemento 102 y propusieron llamarlo, por obvios motivos, nobelio. Los científicos de California, que no estaban acostumbrados a la competición en el juego de los descubrimientos, no confirmaron

los resultados de Estocolmo y dudaron de que el elemento 102 se hubiera producido realmente. Encontraron el elemento, pero mediante un método distinto. Como Seaborg escribió en un artículo de recensión en *Endeavour* en 1959, «en abril de 1958 un grupo consistente en Ghiorso, T. Sikkeland, J. R. Walton y el autor, identificaron en el laboratorio de radiación el isótopo 102^{254} [...] Aunque el nombre de nobelio para el elemento 102 tendrá sin duda que cambiarse, los investigadores no han hecho, hasta el momento de esta redacción, sugerencias para el nuevo nombre». La controversia también involucraba a un grupo de científicos soviéticos, incluyendo a Georgii Flerov, que ponía en duda la afirmación estadounidense y que produjo el elemento 102 bombardeando uranio-238 con iones de neón. Al contrario de lo que Seaborg esperaba, al final el nombre de nobelio fue aceptado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada.

Los experimentos alquímicos de los años cincuenta formaron el entramado para el trabajo posterior en esta área. La síntesis de elementos «transfermiónicos» aun más pesados (con $Z > 101$) continuó, y en 1998 se reconocía la «existencia» de veinte elementos artificiales, el más pesado correspondiendo a $Z = 112$. Los principales actores en la fase posterior de la alquimia moderna fueron el laboratorio Lawrence Berkeley, el centro de investigación nuclear de Dubna en Rusia y la *Gesellschaft für Schwerionforschung* (Sociedad para la Investigación en Iones Pesados) en Darmstadt, Alemania. A algunos pioneros más de la física nuclear también se les reconoció con elementos bautizados en su honor, incluyendo a Rutherford (rutherfordio, Rf, 104), Bohr (bohrio, Bh, 107) y Meitner (meitnerio, Mt, 109). El viejo maestro de la síntesis de elementos, Glenn Seaborg, fue reconocido con el elemento de número 106 (seaborgio, Sg). Normalmente, los elementos no reciben nombres de científicos vivos, pero en 1997 la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada recomendó hacer una excepción en el caso de Seaborg.

Esperanzas y peligros de la energía nuclear

La teoría básica de un reactor nuclear fue desarrollada durante la guerra por Fermi, Wigner y otros, y se comprobó en reactores militares. Después de 1945, se invirtió una gran cantidad de trabajo en completar la comprensión de los procesos de fisión y en desarrollar una teoría detallada del reactor nuclear. En 1958, con la publicación del muy influyente *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors*, de Alvin Weinberg y Eugene Wigner, el trabajo de los físicos había terminado en esta área. Una nueva especie de científico-ingeniero, el ingeniero nuclear, fue la responsable de la segunda fase del desarrollo de reactores nucleares. A los ojos del público, sin embargo, eran físicos, y la ciencia física equivalía a nuevas maravillas tecnológicas.

Los primeros reactores nucleares, comenzando con la pila de Chicago de 1942, eran experimentales (tabla 19.2). Los reactores productores de energía fueron desarrollados en sus comienzos por ingenieros británicos, estadounidenses y rusos. Al principio, la nueva industria nuclear basada en la ciencia avanzó con lentitud, pero a partir de la mi-

TABLA 19.2
Selección de los primeros reactores, 1942-1954

País	*Localidad*	*Puesta en marcha*	*Moderador*	*Potencia (kW)*
EEUU	Chicago	1942	grafito	0,2
EEUU	Oak Ridge	1943	grafito	2.000
EEUU	Chicago	1943	agua pesada	300
GB	Harwell	1947	grafito	100
Canadá	Chalk River	1947	agua pesada	10.000
GB	Harwell	1949	grafito	6.000
URSS	Moscow	1949	agua pesada	500
EEUU	Brookhaven	1950	grafito	28.000
Noruega	Oslo	1951	agua pesada	300
Francia	Saclay	1952	agua pesada	1.500
EEUU	Idaho	1953	(ninguno)	1.400
GB	Obninsk	1954	grafito	30.000

Nota: Todos los reactores eran más o menos experimentales y todos, excepto uno, eran de tipo térmico heterogéneo. La excepción era el reactor de 1953 de Idaho el cual es un cultivador, usando el 90 por 100 de uranio enriquecido y sin moderador. La energía dada en la última columna es la energía térmica.

tad de los sesenta, el ritmo de desarrollo se incrementó drásticamente. Se podría creer que los líderes políticos e industriales de Estados Unidos acogieron la nueva fuente de energía e intentaron utilizar la avanzada posición de la nación en el área para construir un sistema de energía nuclear civil. Sin embargo, éste no era el caso. Mientras que a los explosivos nucleares se les dio una alta prioridad, el interés estadounidense en la energía atómica era inicialmente limitado. El país contaba con grandes reservas de petróleo y carbón, y las empresas industriales no preveían un amplio mercado para la tecnología nuclear. La primera estación de energía nuclear comercial del mundo no fue estadounidense, sino la británica Calder Hall, que empezó a funcionar oficialmente el 17 de octubre de 1956. El reactor se basaba en la labor experimental realizada en Harwell por la Fundación de Investigación de la Energía Atómica, el innovador centro de investigación nuclear británico dirigido por John Cockcroft. Más de un año después, una estación nuclear estadounidense siguió al reactor de Calder Hall, en Shippingport, Pensilvania, diseñada para producir 100 MW de potencia eléctrica. Pero la industria nuclear estadounidense tardó bastante en alcanzar el nivel de las demás. En 1966 Gran Bretaña era todavía el productor de energía nuclear más grande del mundo. Otros países la siguieron más lentamente, en muchos casos después de construir primero, o importar, reactores experimentales (tabla 19.3). El primer reactor soviético estaba listo en 1949 y, cinco años después, los científicos e ingenieros soviéticos habían construido la primera

planta nuclear del país; al menos de algún tipo, ya que producía sólo 5 MW de potencia eléctrica y debería describirse como semiexperimental.

Al principio, el interés de Estados Unidos en la energía nuclear estaba limitado principalmente a aplicaciones militares, lo cual, en lo tocante a reactores, significaba el programa de submarinos con propulsión nuclear de la Marina. Fue durante este programa cuando se construyó el reactor nuclear que por primera vez produjo cantidades apreciables de electricidad. El reactor, denominado Mark I, se encendió en la primavera de 1953. Bajo la dirección del almirante Hyman Rickover, el programa de la Marina siguió adelante vigorosamente y condujo a la botadura en 1955 del *Nautilus,* el primer vehículo del mundo que funcionaba con energía nuclear. Algunos años después, una nave semicivil siguió al *Nautilus,* el rompehielos soviético *Lenin.* Algunos cargueros comerciales fueron equipados más adelante con reactores nucleares, pero las brillantes esperanzas de una flota mundial de naves funcionando con uranio ni siquiera llegaron a materializarse. La utilización marina de reactores nucleares quedó limitada sobre todo a los enormes submarinos. El tipo de reactor favorito de la Marina era el ordinario, o de agua «ligera», en el que se utilizaba agua tanto como moderador como refrigerante. Este tipo de reactor poseía ciertas ventajas técnicas, y, como podía construirse de manera relativamente simple y compacta, era muy adecuado para los submarinos y cargueros que Rickover planeaba. Ésta fue una importante razón para el dominio posterior del reactor de agua ligera en el mercado civil. La expansión explosiva de la industria nuclear estadounidense se produjo durante la administración Kennedy, con la inauguración en 1963 de un reactor de agua hirviendo de 640 MW en Oyster Creek, a petición de Jersey Central Power & Light Co. y manufacturado por General Electric. El mismo año comenzó su funcionamiento el reactor de agua presurizada de 570 MW

TABLA 19.3
Crecimiento en energía en GW (miles de millones de vatios), para usuarios mayoritarios de energía nuclear entre 1954 y 1978

	1954	*1960*	*1966*	*1972*	*1978*
EEUU	0,002	0,482	1,91	14,83	91,71
GB	—	0,414	2,97	4,50	10,95
Francia	—	0,08	1,17	2,71	5,58
URSS	0,005	0,305	1,02	2,62	10,01
Alemania Occidental	—	0,015	0,33	2,33	13,51
Canadá	—	—	0,23	2,00	5,52
Japón	—	—	0,17	1,74	19,32
Italia	—	—	0,60	0,60	1,39
India	—	—	—	0,58	1,18
Suecia	—	—	0,01	0,45	5,58
Total mundial	*0,007*	*1,296*	*8,41*	*34,74*	*184,91*

Connecticut Yankee, construido por Westinghouse. Muchos de los reactores introducidos en Europa y Asia en los años setenta provinieron de estas dos compañías.

Directa e indirectamente, las armas nucleares continuaron siendo un factor extremadamente importante en la evolución de la física en Estados Unidos. Poco después de la guerra, tuvieron lugar muchas discusiones sobre cómo organizar la investigación nuclear en tiempo de paz, especialmente en lo tocante al papel de los militares en la nueva organización y en cómo poner de acuerdo las responsabilidades internacionales con los propósitos de defensa nacional. Muchos físicos y otros científicos atómicos eran activos en estas discusiones y formaron un «movimiento científico» cuyo propósito era, entre otras cosas, trabajar por un control civil de la energía nuclear. Su revista, el *Bulletin of the Atomic Scientists*, se convirtió en un importante foro de política científica y discusiones sobre las consecuencias éticas de la creciente militarización de la física (véase el capítulo 20). Sin embargo, no existía ningún consenso entre los físicos, que estaban muy lejos de formar un frente unificado contra la influencia de las fuerzas armadas. Por ejemplo, la proposición de ley original de 1945 que enfatizaba los intereses militares en la investigación nuclear y atómica recibió apoyo de físicos principales como Lawrence, Fermi, Arthur Compton y Oppenheimer. Sin embargo el resultado del debate político fue la Ley de Energía Atómica de 1946, gracias a la cual se constituyó la Comisión de Energía Atómica (AEC).

La AEC fue una organización civil poderosa, y heredó del estamento militar un gran número de instalaciones de los años de la guerra. Aunque el establecimiento de la AEC fue percibido en general como una victoria civil sobre los intereses militares en los asuntos atómicos, gran parte de la investigación temprana de la AEC fue cedida a las fuerzas armadas. La AEC se convirtió en seguida en uno de los grandes benefactores de la física estadounidense, aunque no era el mayor de ellos. En 1949 la AEC y el Departamento de Defensa (DOD), en una proporción muy aproximada de dos partes respecto a tres, computaban juntos el 96 por 100 de todo el dinero federal invertido en investigación universitaria en la ciencia física. La mezcla de apoyo militar y civil a la física causó poca preocupación entre la mayoría de los físicos, para quienes el dinero no dejaba de ser dinero.

Ya en tiempos del Proyecto Manhattan, la posibilidad de una bomba de fusión o de hidrógeno había sido seriamente considerada y defendida, en concreto por Edward Teller. La idea de utilizar una bomba de uranio para provocar una reacción termonuclear violenta parece que se le ocurrió a Fermi ya en el otoño de 1941. En la primavera de 1946, una conferencia dedicada a la posibilidad de una bomba termonuclear concluyó: «Es probable que una superbomba se pueda construir y que funcione» (Rhodes 1995, p. 255). En cualquier caso, al proyecto se le dio una prioridad baja y posteriormente, en 1946, los estudios sobre la fusión terminaron en Los Álamos. Fue sólo a raíz de la explosión nuclear soviética de 1949 cuando la idea de Teller de una «superbomba» nuclear, apoyada también por Lawrence y Alvarez en Berkeley, fue tomada en serio y consiguió apoyo político. En otoño de 1949, el influyente Comité Asesor General científico (GAC) de la AEC recomendó no proceder con la bomba de hidrógeno. La

mayoría, que consistía en Oppenheimer, Conant y Lee DuBridge (un físico y presidente de Caltech), argumentó con términos éticos y políticos que la bomba era innecesaria –de hecho, no deseada– porque «involucraría una decisión de llevar al matadero a un amplio número de civiles». Fermi y Rabi, aun publicando su apéndice minoritario, estaban de acuerdo en el rechazo de lo que consideraban ser «un peligro para la humanidad en general» y «necesariamente una cosa mala a todas luces». La «súper», escribieron, «no puede ser justificada en ningún campo ético que otorgue al ser humano una cierta individualidad y dignidad incluso si ocurre que sea un residente de un país enemigo» (Badash 1995, p. 93). Ya en 1946, Arthur Compton había avisado que «este desarrollo no debería ser llevado a cabo, principalemente porque deberíamos preferir combatir en una guerra en vez de conseguir una victoria obtenida a expensas del enorme desastre humano que sería causado por su uso determinado» (Rhodes 1995, p. 207).

Existían otras voces, más ruidosas, especialmente la de Teller, que argumentaba con pasión a favor de un programa de choque termonuclear. Durante el principio de la Guerra Fría, su voz llegó a los oídos de muchos políticos y, lo que no sorprende, a muchos generales y almirantes. La recomendación del informe controvertido del GAC no fue aceptada y en 1950 el presidente Truman autorizó el desarrollo de una superbomba basada en la fusión. La mayoría de los mejores físicos estadounidenses, incluidos algunos de aquellos (como Oppenheimer, Bethe y Fermi) que habían discutido en contra de la superbomba, ahora estaban involucrados colectivamente en un esfuerzo para encontrar el camino de cómo construir la bomba. La idea fundamental era la de hacer una masa de mezcla de deuterio y tritio por el enorme calor producido por una bomba de fisión. Durante un tiempo, esto parecía casi imposible, pero en la primavera de 1951, Teller y el matemático Stanislaus Ulam encontraron un modo de concentrar la presión de la radiación de la bomba de fisión de tal modo que comprimiera y calentara el combustible de la fusión. Cuando obtuvo la solución, conocida como la aproximación del acoplamiento de la radiación, se dijo que Oppenheimer se había impresionado porque era «técnicamente tan dulce» (Kevles 1987, p. 378). Con este importante hito, el trabajo en Los Álamos siguió su curso tal como estaba planeado, y en 1952 estaba listo un aparato de prueba termonuclear llamado «Mike». Fue detonado con éxito en el atolón Eniwetok en el Pacífico el 1 de noviembre de 1952. Llevó año y medio de duro trabajo el desarrollo de «Mike» en una bomba real que pudiera ser lanzada desde un avión. El resultado fue «Bravo», que explotó el 1 de marzo de 1954. El rendimiento destructivo fue imponente, correspondiendo a unas 15 megatoneladas de dinamita o más de mil veces la de la bomba de Hiroshima de 1945.

Las bombas de hidrógeno, elaboradas sobre todo por razones políticas, fueron triunfos de la ciencia e ingeniería estadounidenses, pero no tanto para la política mundial estadounidense. En 1949, la unión Soviética explotó su primer aparato nuclear, un equivalente de la prueba «Trinity» estadounidense de 1945 que, como aquella, funcionaba con plutonio. Fue esta bomba la que en gran medida aceleró los esfuerzos estadounidenses para construir una bomba aún más potente y por tanto conseguir una

ventaja decisiva en la Guerra Fría que había sido recientemente, si bien no declarada, sí reconocida como una realidad. Pero la ventaja duró poco. La Unión Soviética siguió con celeridad en su carrera de nuevas armas, primero en agosto de 1953 con un aparato de prueba termonuclear y después en 1955 con una bomba de hidrógeno lanzada desde un avión. El rendimiento estimado en unas cuantas megatoneladas fue menor que la bomba estadounidense, pero era una superbomba y resultó ser sólo el principio. La mayor explosión provocada jamás por el hombre fue conseguida en 1961, cuando la Unión Soviética probó un nuevo tipo de bomba de hidrógeno. El poder explosivo fue de 58 megatoneladas de dinamita, correspondientes a casi 5.000 bombas de Hiroshima.

Energía de fusión controlada

A partir del trabajo hecho en la bomba de hidrógeno, era natural estudiar la posibilidad de usar la energía de fusión también para fines pacíficos, en concreto con el objeto de desarrollar un reactor de fusión como análogo al reactor de fisión. El primer intento en esta dirección, confinando plasma caliente en un campo magnético, no fue por inspiración de la bomba de hidrógeno, sino por la teoría de las reacciones termonucleares de Bethe. Ya en 1938, dos físicos estadounidenses de física aplicada, Arthur Kantrowitz y Eastman Jacobs, intentaron obtener fusión en un gas de hidrógeno enrarecido encapsulado en un toroide magnetizado. De manera no sorprendente, fracasaron. La posibilidad de la fusión controlada fue debatida durante la última fase del Proyecto Manhattan, pero no fue sino hasta 1951 en que se convirtió en un programa de investigación real bajo la AEC. El programa, conocido como Proyecto Sherwood, incluía a un gran número de laboratorios destacados de física, y se realizaron ocho conferencias de Sherwood entre 1952 y 1958. Los participantes más importantes de Sherwood fueron Los Álamos (con 46 físicos participantes en una o más de las conferencias de Sherwood), la Universidad de Princeton (con 41), el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California (con 86), y el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (con 22). Sherwood era gran ciencia, y ciencia cara. El presidente de la AEC entre 1953 y 1956, Lewis Strauss, fue un gran defensor de la fusión controlada, y estaba convencido de que el programa tendría éxito solamente si se le dotaba de suficientes recursos. El dinero no fue un problema: desde 1954 a 1958, Strauss incrementó la inversión en el programa de fusión desde los 1,8 millones a los 29,2 millones. «Sin duda, no existe una reducción de dinero para este trabajo», destacaba un informe sobre el Proyecto Sherwood en 1956. «De hecho, uno tiene la impresión al visitar sus diversas instalaciones que el número de dólares disponibles por cada buena idea más bien es incómodamente grande. Existe con certeza un sentimiento de algo de presión para que se gaste el dinero que está disponible» (Bromberg 1982, p. 44). En los Estados Unidos, el pionero de la fusión controlada fue Lyman Spitzer, un astrofísico que había trabajado a tiempo parcial en el proyecto de la bomba de hidrógeno y cuyos estudios astrofísicos le habían convertido en un experto en la física del plasma.

La idea fundamental de la energía de fusión controlada es simple, en concreto, algo así como confinar un plasma de hidrógeno pesado y caliente mediante campos mag-

néticos y calentar el plasma a los muchos millones de grados necesarios para que los procesos de fusión ocurran con una frecuencia razonable. En su etapa más temprana, los principales problemas encontrados eran: (1) calentar el plasma; (2) mantener el proceso de fusión, esto es, hacer que la energía liberada en el plasma fuera al menos suficiente para mantener la temperatura, y (3) confinar el plasma en un estado estable. Spitzer sugirió usar la reacción deuterón-tritón $^{2}H + {}^{3}H \rightarrow {}^{4}He + n + 17{,}6$ MeV, que habría sido más fácil de conseguir que la reacción deuterón-deuterón, bien en la forma $^{3}He + n + 3{,}2$ MeV o bien como $^{3}H + {}^{1}H + 4{,}0$ MeV. Entre las desventajas de la primera reacción mencionada era que usaba tritio, que no existe en la naturaleza, pero esto fue más que compensado por la producción mayor de energía y la menor temperatura de ignición necesaria para un proceso autosostenible. Mientras que esta temperatura es de unos 45 millones de K para el proceso de deuterón-tritón, es de unos 400 millones de K para los procesos deuterón-deuterón.

Los estadounidenses afrontaron el problema del confinamiento de modos distintos, de entre los cuales mencionaremos sólo la solución técnica más favorecida en la fase temprana, conocida como el *stellarator*. Spitzer demostró teóricamente que un toro enroscado en forma de ocho (un tubo *stellarator*) y suplido con bobinas portadoras de corriente proporcionaría un campo magnético axial adecuado para confinar el plasma. El programa *stellarator* fue iniciado en 1951 primariamente en la Universidad de Princeton. Los experimentos con el *stellarator* sufrieron varias modificaciones y su diseño fue gradualmente mejorado al ir consiguiendo los físicos más conocimientos. A finales de 1954, Spitzer y su grupo tenían listo un *stellarator* a gran escala (llamado modelo D), una máquina de más de 150 metros de largo que operaba a una temperatura de unos 200 millones de K. La inversión total se estimó en cerca de mil millones de dólares y se estimaba que la máquina podría proporcionar una salida neta de potencia eléctrica de 5 GW.

En cualquier caso, no se llegó tan lejos. En 1954, Teller arguyó que aparecerían inestabilidades en el *stellarator* ante corrientes grandes, y la evidencia experimental de 1955 parecía confirmar su predicción. El trabajo con el modelo D fue detenido y se decidió ganar en experiencia con los modelos más pequeños para poder encontrar formas de estabilizar el plasma. Al cambiar la geometría esto se comprobó como posible, pero sólo en cierto grado y, a partir de 1956, el programa *stellarator* estaba en un estado de incertidumbre, si no de crisis. A pesar de las numerosas dificultades, el costoso programa continuó en una cierta atmósfera artificial de optimismo. En 1957 se empezó el trabajo de diseño y construcción del *stellarator* de modelo C, diseñado para conseguir una temperatura de unos 100 millones de grados Kelvin. En esa época, la actitud oficial era aún optimista. Amasa Bishop, un físico de altas energías que desde 1953 era el miembro responsable del AEC para el Proyecto Sherwood, escribió sobre el programa del *stellarator:* «Numerosas dificultades experimentales continúan plagando el progreso del trabajo; existen, sin embargo, razones para creer que estas dificultades pueden y serán vencidas con el tiempo». Sobre el proyecto Sherwood en general: «Con ingenio, trabajo duro y un poquito de buena suerte, parece incluso razonable esperar que un

aparato de producción de energía termonuclear a gran escala pueda ser construido en el siguiente decenio o dos decenios» (Bishop 1958, pp. 167 y 170). Después de todo, el concepto de *stellarator* sólo era una forma de entre varias de mantener el plasma confinado en las condiciones adecuadas. Quizá fue un poco de buena suerte el que faltó al proyecto de *stellarator*. El proyecto continuó hasta finales de los años sesenta, pero nunca llegó a ceder paso a lo prometido. En esa época un nuevo concepto, conocido como el *tokamak* y primero desarrollado por los investigadores rusos, empezaba a parecer más prometedor. En consecuencia, los físicos de Princeton cambiaron su proyecto de *stellarator* por un proyecto *tokamak*. El cambio mundial alrededor de 1970 hacia las máquinas *tokamak* ha sido descrito como un cambio de paradigma en la investigación de la fusión.

Durante la primera Conferencia Internacional sobre Usos Pacíficos de la Energía Atómica en Ginebra en 1955, Homi Bhabha, el físico indio y jefe de la Comisión de Energía Atómica de su país, se refirió a la fuente de energía del futuro en términos no menos optimistas que los de Bishop: «Los problemas técnicos son formidables, pero [...] me aventuro a predecir que se encontrará un método para liberar energía de fusión de una manera controlada en las dos décadas que vienen. Cuando esto ocurra, los problemas energéticos del mundo realmente habrán sido resueltos para siempre, ya que el combustible será tan abundante como el hidrógeno pesado de los océanos» (Bromberg 1982, p. 67). Una de las razones del interés en la fusión controlada es que prometía un suministro prácticamente inagotable de energía barata. Incluso a principios de los años cincuenta, sin crisis energética alguna que amenazara, existía la percepción de que las reservas de los combustibles fósiles eran limitadas y que el combustible nuclear en forma de uranio no podía ser la respuesta final al consumo mundial en constante aumento. La comunicación de Bhabha era una de las primeras veces en que un físico habló abiertamente de la fusión controlada. El trabajo en el programa de fusión estadounidense era clasificado, y la propia existencia del Proyecto Sherwood se suponía que era un secreto. Éste también era el caso de similares proyectos en otros países. Una de las razones para el secretismo era la significación militar de las fuentes intensas de neutrones que la fusión controlada proporcionaría. Sin embargo, en 1956 se decidió que no había razones ni militares ni políticas para mantener el trabajo en secreto. En 1958, en tiempos de la segunda conferencia de Ginebra, los Estados Unidos desclasificaron la mayoría de sus trabajos y liberaron información sobre el *stellarator* y otros conceptos de la fusión controlada.

Los Estados Unidos no estaban solos en el intento de desarrollar la fusión controlada. En Gran Bretaña, George P. Thomson pensó en esta posibilidad ya en 1945 y al año siguiente entregó una petición de patente de un aparato en el cual el deuterio gaseoso se calentaba mediante una corriente alterna de alta frecuencia. La idea de Thomson era un aparataje de efecto «pinch» (o «pellizco» en castellano) en el cual el campo magnético confinando el plasma no era externo, sino que estaba provisto por la misma corriente del plasma. Los experimentos de fusión británicos, que usaban tanto las ideas de Thomson como las de Peter Thonemann de la Universidad de Oxford, empe-

zaron en 1949, antes del correspondiente trabajo americano. Estos experimentos resultaron en la máquina ZETA (de Zero-Energy Thermonuclear Apparatus), un toro relleno de deuterio gaseoso y encendido por un pulso de 100.000 amperios o más. Cuando fue puesta en funcionamiento por primera vez la ZETA, se observaron en el plasma un gran número de neutrones, los cuales se estimaban que tenían una temperatura de al menos un millón de grados Kelvin. Fue un resultado prometedor pero no estaba claro si los neutrones realmente eran de origen termonuclear y, por tanto, que se hubiera conseguido la fusión. En 1958 resultó que la mayoría de los neutrones no eran termonucleares. La ZETA compartió el destino del *stellarator*. Ambos fueron decepcionantes, si bien no proyectos inútiles.

Incluso si los abundantes recursos usados en los procesos termonucleares controlados no creaban un reactor de fusión, sí que creaban una nueva comunidad científica. La física de plasma es un objeto de estudio más antiguo y mucho más amplio que la fusión. La investigación en esta área se realizó en los años veinte y treinta, cuando Langmuir era el pionero en los aspectos experimentales y Landau en los aspectos teóricos. En cualquier caso, el interés en el campo era disperso y estaba limitado a plasmas de bajas temperaturas. La combinación de los estudios clásicos sobre plasma con la nueva física de plasma magnético transformó la especialidad en una subdisciplina científica importante. La desclasificación y libre intercambio de información entre investigadores estadounidenses, británicos y soviéticos después de la conferencia de Ginebra de 1958 proporcionaron las condiciones de formación de una comunidad internacional de físicos de plasma: como expresó el físicos soviético Lev Artsimovih en su comunicación a la conferencia de Ginebra, «este problema [la fusión controlada] parece haber sido creado especialmente con el objetivo de desarrollar una estrecha cooperación entre los científicos e ingenieros de varios países, que trabajan en este problema de acuerdo a un plan común y continuamente intercambiando los resultados de sus cálculos, experimentos y avances de ingeniería» (Post 1995, p. 1640). A la desclasificación le vino asociada una marea de publicaciones, la mayoría de ellas clasificadas con anterioridad. Los investigadores de la fusión ahora empezaban a publicar en revistas de física corrientes, tales como *Physical Review* y también en la recientemente fundada *Physics of Fluids* o, en la Unión Soviética, *Atomic Energy*. Además disponían de la revista *Nuclear Fusion*, que fue creada en 1960 por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) y abarcaba artículos en inglés, ruso, francés y español. La nueva situación resultó rápidamente en nuevos cursos universitarios y programas de posgrado de física de plasma de altas temperaturas y en un incremento de doctores en física en este campo. En los Estados Unidos el número subió de 14 en 1960 a 99 en 1963, siendo en su mayoría de la Universidad de Princeton, donde la física de plasma se había convertido en el mayor programa de investigación en 1958. Otro indicador de la fuerza del nuevo campo fue la creación de la División de Física de Plasma en la American Physical Society. El cambio desde un programa secreto orientado hacia una misión, a una disciplina científica normal implicaba un cambio en los métodos y estándares adoptados por los físicos del plasma. La aproximación de ingeniería y a veces de ensa-

yo y error dieron paso a métodos más sistemáticos y rigurosos, conformes con aquellos de otras disciplinas de física académica. El proceso hacia la respetabilidad científica, sin embargo, no tuvo lugar sin problemas y hubo físicos que veían la nueva disciplina con escepticismo. Durante un tiempo, la investigación en plasma y fusión gozó de una baja reputación académica, en parte debido a su herencia de un proyecto clasificado como secreto dependiente básicamente de métodos de ingeniería.

Cuarenta años y varios miles de millones de dólares después de que Thomson y Spitzer pensaran por primera vez en cómo obtener energía de fusión, los físicos e ingenieros siguieron con sus intentos de desarrollar un aparato productor de energía. En 1990 el *tokamak* todavía era considerado el concepto de energía de fusión más prometedor por su excelente habilidad de confinar el plasma. En aquella época, las máquinas mayores eran la TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) de Princeton y la europea JET (Joint European Torus). A finales de los años ochenta, ambas máquinas consiguieron una calidad de confinamiento –el producto de la densidad del plasma y el tiempo que la energía permanece en el plasma antes de filtrarse– de $1{,}5 \times 10^{20}$ seg m^{-3} y una temperatura de unos 20 kEV (correspondientes a unos 150 millones de K). Éstas son condiciones cercanas al nivel crítico, donde se produce más energía de la que es usada. Como alternativa a los métodos de confinamiento magnéticos, la antigua técnica del efecto «pinch» fue revivida y desarrollada perfectamente en los años noventa. Los prometedores resultados hicieron concluir a un destacado físico e ingeniero que «si podemos empezar pronto a diseñar y construir el gran escalafón siguiente [la máquina de 400 millones de dólares X-1], creemos que podemos terminar el trabajo en diez años» (*Scientific American,* agosto 1998, p. 27). De todos modos, al final del milenio un reactor que produzca energía no se ha hecho realidad y la energía de fusión comercial sigue siendo un sueño del futuro, incluso posiblemente de un futuro lejano.

CAPÍTULO 20

Militarización y megatendencias

La física: ¿una sucursal militar?

«La Segunda Guerra Mundial marcó un hito para la ciencia estadounidense y para sus científicos. Cambió la naturaleza de lo que significaba hacer ciencia y alteró de manera radical la relación entre ciencia, administración [...] ejército [...] e industria» (Forman 1987, p. 152). Eso escribió en 1984 Jerrold Zacharias, un importante físico de la década de los cincuenta con gran experiencia en proyectos militares y políticas científicas. El punto de inflexión marcado por la guerra dependía en gran medida de una nueva escala y estructura de financiación de la ciencia, en concreto, un aumento espectacular de las subvenciones federales (a escala nacional). Antes de la guerra, dichas ayudas eran insignificantes, alrededor de un millón de dólares para la totalidad de la investigación básica de física en los Estados Unidos. Se ha estimado que el montante total de dinero federal para física básica en 1953 fue de unos 42 millones de dólares, o la mitad de esa cantidad expresada en dólares de 1938. Los fondos federales reales para física básica en el periodo se vieron, por tanto, incrementados en un factor de al menos veinte veces. Además, existía el apoyo de la Fundación Rockefeller y de otros filántropos, pero esta forma de financiación se convirtió en relativamente insignificante en una era dominada por subvenciones masivas de la administración pública federal.

En los años cincuenta y sesenta, los fondos federales eran en general sinónimo de presupuestos militares o de dinero del Departamento de Defensa y de la Comisión Energética Atómica (de carácter civil pero, en la práctica, orientada hacia lo militar). El gráfico 20.1 resume de qué manera los gastos militares para investigación y desarrollo (I+D) cambiaron entre 1935 y 1985. Hay que tener en cuenta que el I+D es una categoría mucho más amplia que la ciencia, que a su vez es más amplia que la física. El objetivo es destacar la escala de la investigación militar y el gran porcentaje que constituye lo subvencionado por la administración pública. Por supuesto, sólo había una pequeña parte de este dinero destinada a la física, pero era una parte fundamental del

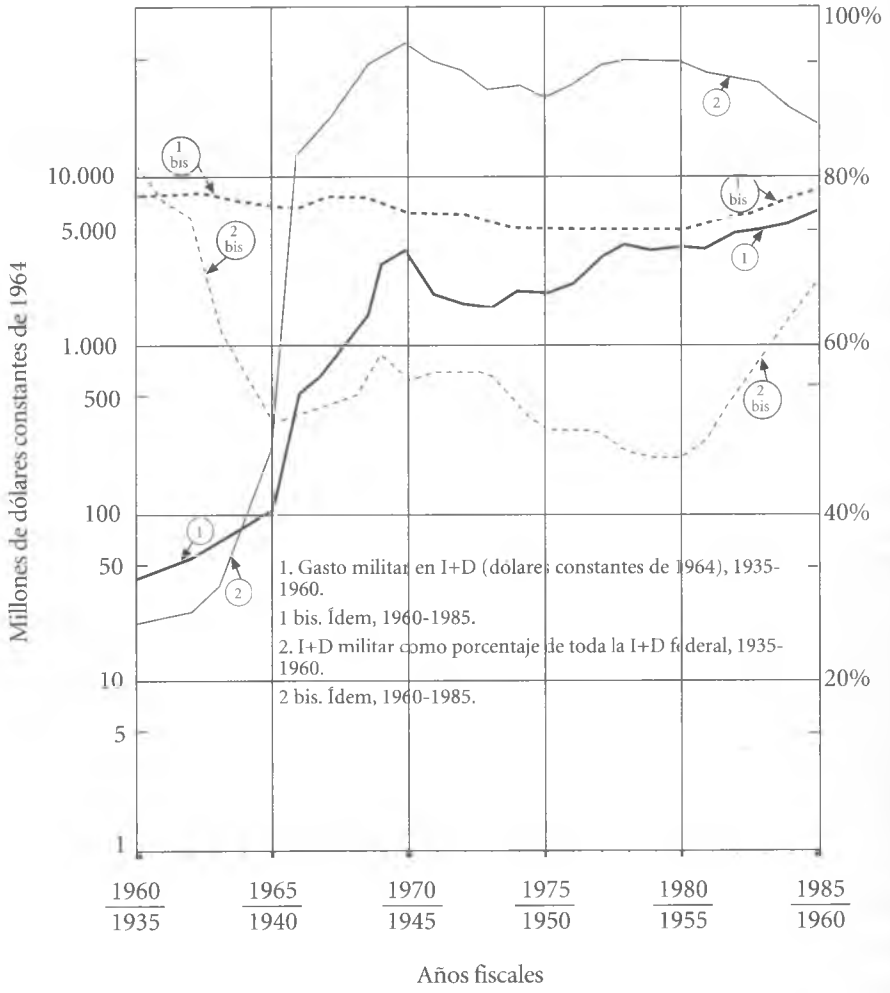


Gráfico 20.1. El desarrollo de los gastos de I+D militares de EEUU, 1935-1985. El gráfico está doblado para facilitar una comparación entre los dos periodos 1935-1960 y 1960-1985. *Fuente:* © 1987 por The Regents of the University of California. Reimpreso de *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences,* vol. 18, gráfico p. 153, con permiso.

presupuesto de la física estadounidense y, por tanto, de la física mundial. En torno a 1950, alrededor del 70 por 100 de todo el tiempo de investigación de los físicos en la universidad se empleaba en estudios patrocinados por el Departamento de Defensa (DOD, por sus siglas en inglés) o la Comisión de Energía Atómica (Atomic Energy Commission, AEC). Al mismo tiempo, el 98 por 100 de los 22 millones de dólares empleados por el gobierno en física académica venía de una de las dos instituciones mencionadas. Con el auge de la Fundación Nacional de la Ciencia (National Science Foundation, NSF), el porcentaje disminuyó, pero no de manera drástica. En 1960, bajó al 92 por 100. Los datos de apoyo federal a la física fundamental de estado sólido ilustran la

estructura general de distribución de fondos. En 1953, esta área recibió 3,1 millones de dólares en apoyos federales, de los cuales solamente 10.000 dólares venían de la NSF. Dos años después, el apoyo se incrementó a 4,5 millones con 3,8 millones provenientes del presupuesto militar, 0,6 millones de la AEC y 0,1 millones de la NSF. El apoyo militar se dividía entre el Ejército, la Marina y las Fuerzas Aéreas en una proporción de 7 : 6 : 5. Sin fijarnos en los detalles, durante las dos primeras décadas después de la guerra, las fuentes dominantes de financiación de la física estadounidense estaban todas relacionadas con el sistema militar.

No debería sorprendernos que algunos físicos pensaran que su ciencia estaba peligrosamente cercana a convertirse en una simple rama de la estructura militar. Philip Morrison, uno de los científicos jóvenes del Proyecto Manhattan, hizo constar su preocupación en 1946, declarando que «por cada dólar que la Universidad de California gasta en sus físicos de Berkeley, la Armada gasta siete [...] En algunas escuelas el noventa por 100 de su apoyo en investigación proviene de los fondos del Ejército». Morrison estaba preocupado de lo que parecía una militarización de la física, pero se dio cuenta del dilema que afrontaban tanto él como sus colegas, «el físico sabe que la situación es equivocada y peligrosa. Sabe que debe seguir adelante, porque sin duda necesita el dinero [...] No es sólo que la guerra le ha enseñado que un esfuerzo muy apoyado económicamente puede aumentar mucho su efectividad, sino también que su campo ya no sigue girando en torno a lo que hacen posible pequeños grupos de hombres [...] el físico necesita apoyo más allá de la capacidad de las universidades. Si la ONR [Oficina de Investigación Naval, Office of Naval Research], o su nuevo equivalente en la Armada, el G-6, aparece con un buen contrato, sería casi imposible rechazarlo» (Morrison 1946, p. 5). Morrison hizo campaña para que la NSF civil, entonces cuestionada, sustituyese a las instituciones militares como principales benefactores de la física.

La filosofía de la NSF estaba basada en gran medida en las ideas de Vannevar Bush en su informe de 1945, *Science: The Endless Frontier.* En este influyente trabajo, Bush propugnaba una «organización controlada por lo civil con relaciones estrechas con la Armada y la Marina, pero con fondos directos del Congreso, y el poder claro de iniciar investigación militar que servirá como suplemento y fortalecimiento a la investigación llevada a cabo directamente a través del Ejército y la Marina» (Schweber 1989, p. 676). No obstante, cuando la NSF empezó en 1950 tenía unos recursos muy limitados, y por tanto una importancia relativamente baja en sus comienzos. Sólo en 1972 ocurrió un cambio importante al aprobarse en el Congreso de Estados Unidos la enmienda de Mansfield, en virtud de la cual las instituciones militares debían restringir sus esfuerzos investigadores a proyectos de relevancia militar y abandonar su compromiso con la investigación básica. Aunque siempre hubo físicos resentidos por el papel militar en la ciencia civil, eran pocos y sin mucha influencia. Al declararse la Guerra de Corea, las críticas fueron muy silenciadas. Muchos físicos que eran críticos con el dominio militar ahora aceptaban la situación y estaban dispuestos a trabajar para los militares o a recibir su dinero.

Los nexos entre lo militar, la industria de defensa y los físicos fueron reforzados aún más después del llamado «impacto del *Sputnik*» en 1957. En ese mismo año, el presidente Eisenhower estableció una nueva institución en la Casa Blanca, el Comité Asesor del Presidente en Ciencia, dirigido por James Killian, presidente del MIT (Massachusetts Institute of Technology). El comité de Killian estaba dominado por físicos, así como el de su sucesor, Jerome Wiesner, asesor científico del presidente Kennedy. Tanto Killian como Wiesner estudiaron física e ingeniería y tenían conexiones cercanas con los militares. El nacimiento en 1958 de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) produjo nuevas ventajas para los físicos. La Guerra Fría y la carrera espacial y de misiles crearon oportunidades únicas para los físicos que ahora podían en muchos casos elegir entre los fondos de la administración militar (DOD), civil (NSF, NASA) y cuasi-civil (AEC) para sus proyectos de presupuestos más elevados que nunca. En los años sesenta, los físicos de Estados Unidos estaban en la cúspide del mundo, en lo económico, social y científico. La atmósfera general de entusiasmo por la ciencia y de optimismo tecnológico sin barreras ha sido descrita entusiastamente por Daniel Kevles: «Era una época en la cual los estadounidenses señalaban a los físicos nucleares como la tercera mejor profesión en cuanto a su estatus, habiendo sido los decimoquintos en 1947, por encima de todos excepto de los jueces de la Corte Suprema y de los médicos; cuando los físicos, entre otros científicos, eran identificados no sólo como los constructores de bombas y misiles sino los progenitores de aviones, ordenadores, telefonía de marcación directa, radios de transistores, equipos de sonido estereofónicos y televisión en color, cuando la investigación y desarrollo en el cual Clark Kerr, presidente de la Universidad de California llamó a ésta la "era de la industria del conocimiento" eran supuestas generadoras de una expansión económica infinita» (Kevles 1987, p. 391).

Los físicos estaban mimados también en lo económico. En 1958, la población de físicos era de 12.702, siendo sus dos campos principales la física nuclear (2.622) y la física de estado sólido (1.926). En términos cuantitativos, la comunidad de físicos no era tan impresionante. En el mismo año, Estados Unidos contaba con 35.805 químicos y 18.015 biólogos; incluso las ciencias de la tierra, con 13.071 geólogos, tenían más científicos que la física. Pero aunque había casi tres veces más químicos que físicos, la química recibió sólo la mitad de fondos federales para investigación. Cada físico recibió de media 11.000 dólares, siendo la cantidad para cada químico de 1.900 dólares, para cada biólogo 4.900 y para geólogos y matemáticos las cantidades eran de 1.800 y 1.700 respectivamente.

El apoyo militar no estaba limitado a las áreas de pertinencia directa e incluso indirecta a lo bélico, sino que cubrían todos los aspectos de la física, incluyendo áreas que parecerían de mínima importancia para los intereses militares. Numerosos laboratorios, conferencias, escuelas de verano y proyectos de investigación eran financiados en parte o completamente por las instituciones militares. El sistema enseguida se multiplicó como las setas convirtiéndose en una industria propia y en una parte natural de la vida diaria de los físicos y, en cierto modo, así sigue siendo en nuestros días. Como ejemplo de investigación militar física en lo que parecería estrictamente un área no mi-

litar, estarían los Laboratorios de Investigación Aeronaútica (Aeronautic Research Laboratories, ARL) en la base aérea Wright-Patterson en Ohio. Encabezada por Joshua Goldberg, en 1956 los ARL iniciaron una investigación importante y un programa de apoyo a la relatividad general, en una época en que esta rama de la física matemática era incluso más esotérica e inútil que hoy en día. Durante sus dieciséis años de existencia –fue eliminado por la enmienda Mansfield– el programa desempeñó un papel muy importante en la revitalización de la teoría de la relatividad general. Por ejemplo, apoyó a teóricos punteros como John Wheeler, Hermann Bondi, Pascual Jordan, Felix Pirani, Roy Kerr y Alfred Schild. Como una de sus primeras actividades, los ARL apoyaron, junto con la Oficina de Investigación de la Artillería y la NSF, la conferencia de Chapel Hill de 1957 sobre «El papel de la gravitación en la física», subvencionando incluso los viajes desde Europa por transporte militar aéreo para los participantes europeos. Durante sus últimos años, los ARL organizaron más conferencias, apoyaron a teóricos estadounidenses y extranjeros y firmaron contratos con universidades. El trabajo resultante del programa era científicamente relevante, pero a duras penas de relevancia militar. Los títulos típicos de los informes de los ARL eran «Cuantización de las teorías de campo covariante» (de Peter Bergmann) o «Contribuciones a los problemas reales de la relatividad general» (de Jordan).

La más importante de las primeras agencias de patrocinio militar en ciencia era probablemente la ONR, la cual en 1949 podía decir que «el inmenso programa universitario de investigación del Departamento de la Marina es la cooperación más grande en tiempos de paz llevada a cabo en la historia entre el mundo académico y el gobierno». Con un gasto total de aproximadamente 20 millones de dólares, «casi 3.000 científicos y 2.500 estudiantes universitarios están involucrados de manera activa en proyectos de investigación básica en los numerosos campos de interés vital para la Marina» (Schweber, 1988, p. 17). El gasto de la ONR era menos del 5 por 100 del gasto de la Marina en investigación y desarrollo hasta 1950 (aproximadamente 1,8 miles de millones), pero aun así más que duplicaba el dato total de 1940 de 8,9 millones. En otras palabras, a lo largo de una década, el gasto de la Marina en investigación y desarrollo se multiplicó por el increíble factor de veinte. Entre las numerosas actividades de la ONR se encontraba el patrocinio del Laboratorio de Ciencia e Ingeniería Nuclear del MIT, con un presupuesto en 1950 de casi 1,2 millones. La ONR también organizó conferencias y escuelas de verano, siendo el estudio «Proyecto Hartwell» de 1950 uno típico suyo. Éste era un proyecto concertado entre el MIT y la ONR, dirigido por Zacharias, director del Laboratorio de Ciencia e Ingeniería Nuclear. Su objetivo era estudiar la guerra submarina, incluyendo su coordinación con las armas atómicas tácticas. El breve e intensivo estudio atrajo a algunos de los mejores físicos de la nación, como Luis Alvarez, Robert Dicke, Philip Morse, Charles Lauritsen, Edward Purcell y Jerome Wiesner. Era uno más de los numerosos proyectos de estilo similar que estaban siendo conducidos entonces y sin duda durante lo que quedaba de siglo. Fue muy importante para los primeros proyectos de defensa el hacer partícipes a físicos excepcionales de gran valía científica y de importancia como mérito académico: si un premio Nobel y

destacado físico podía unirse a un proyecto militar, ¿no debería hacerlo usted? La Marina y el resto de las fuerzas armadas disfrutaron de un admirable éxito en la estrategia. Sería muy difícil poder mencionar a un físico estadounidense importante que sistemáticamente se negara a trabajar en proyectos militares. Desde 1950, más de treinta premios Nobel habían recibido fondos directos del Departamento de Defensa. La participación en trabajos orientados hacia la defensa se aceptó pronto e incluso era considerada como una cualificación académica.

Estados Unidos no fue el único país en movilizar físicos al servicio de la Guerra Fría, también lo hizo la Unión Soviética. Tanto por razones científicas como militares, era importante para los americanos y para sus aliados occidentales conocer qué pasaba dentro de los laboratorios soviéticos. La inmensa mayoría de la investigación soviética no clasificada era publicada en ruso, y por esa mera razón no era fácilmente accesible para los científicos occidentales. En 1955, el Instituto Americano de Física, con el apoyo de la NSF inició un programa de traducción de revistas científicas soviéticas para que los físicos occidentales pudieran estar al tanto de los últimos avances en la Unión Soviética. Hacia 1959, nueve revistas soviéticas eran traducidas por completo, juntando unas 13.000 páginas en conjunto. Las revistas traducidas incluían la *JETP (Revista de Física Teórica y Experimental),* la revista de resúmenes *Uspekhi* y *Doklady*, la sección de física de las Actas de la Academia de Ciencias de la URSS.

¿Cuál fue el efecto del patrocinio militar masivo de la física estadounidense? En primer lugar, desde luego, hizo que creciera realmente, no sólo en física aplicada, sino en física fundamental, donde la posición estadounidense fue reforzada en su liderazgo mundial. Aparte del efecto que los intereses militares tenían en la escala, organización y prioridades de la física, también es posible que influyera en el tipo de física que se investigara y en la actitud de los físicos hacia su ciencia –«la naturaleza de lo que significa hacer ciencia», en palabras de Zacharias. Algunos historiadores de la ciencia han sugerido que había en este periodo una orientación general hacia los aspectos de ingeniería y física aplicada, justo el tipo de física en el cual estarían interesados los militares. El espíritu militar se puede identificar incluso en la teoría esotérica, según argumentan, en la actitud pragmática e instrumental hacia la física de altas energías que caracterizaba a muchos teóricos estadounidenses. Mientras que la teorización pragmática no era un invento de la guerra, sino un hecho característico incluso en los años treinta, se puede argumentar que la implicación de los físicos en los proyectos militares reforzó una tendencia ya existente y la convirtió en una norma a escala mundial. Sea cual sea la validación de la premisa (la cual es difícil de especificar e incluso más difícil de probar), es un hecho que los físicos norteamericanos estaban bastante interesados en aquellos campos de la ciencia que parecían de interés militar, incluyendo electrónica, instrumentos, física nuclear y física del estado sólido. Es entendible que esos campos se llevaran gran parte del pastel de los fondos federales. En 1953, por ejemplo, el 64 por 100 de los fondos federales para investigación básica no clasificada en departamentos universitarios de física fue destinado a la física nuclear, entendida de manera amplia. La física del estado sólido recibió un 10 por 100, la investigación de rayos

cósmicos un 6 por 100, la física atómica 5 por 100 y la física de bajas temperaturas un 1 por 100. (Véase también la tabla 21.4 del capítulo 24.)

La breve descripción dada aquí se ha detenido exclusivamente en el escenario estadounidense, donde la evolución histórica de la relación entre física y defensa ha sido objeto de muchos estudios detallados. Mucho menos trabajo histórico ha sido realizado a propósito de las relaciones correspondientes en Europa y en la Unión Soviética. No hay duda de que el caso americano era de particular importancia, no sólo por ser una relación más cercana y de una dimensión desconocida en Europa, sino también porque Estados Unidos era el líder político, militar y científico del mundo occidental. La relación entre los físicos y los militares era tan cercana, o incluso más, en la Unión Soviética, pero se sabe muy poco hasta ahora de la interacción entre los dos estamentos. Lo militar desempeñó un papel importante en algunos países europeos, especialmente en Francia y en Inglaterra, pero su papel no llegaba ni de lejos a ser tan importante como el de los Estados Unidos. Y en algunos de los países europeos más pequeños, los militares no desempeñaban papel alguno en la física.

Cualesquiera que fueran los roles atribuidos por las fuerzas militares en los sistemas científicos de Europa y de los Estados Unidos, las dos regiones dominantes de la ciencia mundial evolucionaron de manera bastante diferente durante la década siguiente a la finalización de la Segunda Guerra Mundial. Una razón importante para explicar el retraso de la física europea era simplemente que las naciones europeas estaban más empobrecidas que los Estados Unidos. Cuando un físico nuclear estadounidense visitó las instalaciones de física italianas en 1950, notó que éstas «están gravemente empobrecidas por la falta de dinero para poder investigar y con salarios bajos para los físicos». Para los lectores de *Physics Today* (*Física Hoy*), relató que el laboratorio de física de la Universidad de Roma, orgullo de Italia, operaba con un presupuesto anual de 20.000 dólares, «una suma que podría parecer ridícula para cualquier universidad similar en Estados Unidos» (*PT*, enero 1951). Aunque la diferencia en productividad y calidad entre los dos mundos de la física no eran debidas sólo a razones económicas: estaba tanto o más enraizado en las diferentes mentalidades, tradiciones culturales y en sistemas educativos. Esto fue reconocido de manera clara por un físico francés, André Guinier, después de regresar en 1947 de una visita de dos meses a unos laboratorios estadounidenses. En una comparación reveladora entre ambos países, hizo hincapié en que los físicos americanos se especializaban desde jóvenes, mientras que los franceses «tenían un gusto por la no especialización» que les desfavorecía a la hora de producir resultados científicos. «El dilema real es elegir entre tener un conocimiento profundo pero limitado o tener un conocimiento menos profundo pero ampliado a lo largo de varios aspectos», escribió. «Es en esta decisión en la cual los estadounidenses difieren de nosotros. Nosotros siempre consideramos la cultura general como superior. Pero a menudo nos olvidamos de reconocer que eso es superficial». Guinier estaba impresionado por la atmósfera informal y cordial que observó en los laboratorios americanos y lo consideró como una razón primordial para explicar el éxito de la física estadounidense: «Entre directores y trabajadores, las relaciones son muy libres. El trabajador jo-

ven llama a su jefe por su nombre de pila [...] en este punto uno no puede sino envidiar el sistema estadounidense: es indispensable en el trabajo científico que la autoridad no sólo provenga del rango sino de las capacidades. Esta atmósfera hace posible el trabajo en equipo. Hay pocos artículos en las revistas americanas que no estén firmados por dos o más nombres. Existen trabajos recopilados por el conjunto de trabajadores de laboratorios grandes [...] Apenas ha habido similares intentos de trabajo en equipo en Francia que se hayan coronado con éxito» (*PT*, mayo 1950).

Máquinas grandes

El dinero a lo grande no es condición suficiente, pero sí necesaria, para la «gran ciencia», por tanto no sorprende que la era de la gran ciencia en física coincidiera con el incremento en las provisiones de fondos de las administraciones. Sin embargo, es importante señalar que la gran ciencia no sólo es cuestión de tamaño o dinero, y que tampoco es puramente un fenómeno posbélico. El observatorio de Tycho Brahe (1580), la máquina electrostática de Martinus van Marum (1784) y el telescopio gigante de Earl de Rosse (1845) eran todos muy grandes y extraordinariamente caros en relación con los presupuestos para investigación de sus épocas respectivas. Pero eran excepciones, y no fue sino hasta la primera mitad del siglo XX en que el equipamiento y los laboratorios de la gran-proto-ciencia empezaron a influir en el curso de la ciencia. Anteriormente, hemos mencionado el laboratorio de bajas temperaturas de Kamerlingh Onnes en Leiden como un ejemplo, y los ciclotrones de Lawrence en los años treinta del siglo XX como vanguardia de las instalaciones científicas de la gran física. Los grandes y caros ciclotrones necesitaban de una nueva organización de investigadores, un nuevo espíritu de trabajo. Las máquinas dieron paso al trabajo en equipo y aumentaron la demanda de fondos externos y facilitaron el paso hacia una nueva actitud de lo que constituye la ciencia con éxito. Estos cambios en los contextos internos y externos de la ciencia, más que por el cambio de escala, convirtieron el sistema de la gran ciencia en un fenómeno importante. Aunque la gran ciencia de la posguerra estaba lejos de estar limitada a la física –desempeñaba un papel de similar importancia en astronomía, por ejemplo– se desarrolló con más espectacularidad en asociación con aceleradores y otros instrumentos usados en física de altas energías. Más que intentar describir el desarrollo por completo, lo ejemplificaremos al mencionar unas pocas máquinas y los laboratorios más destacados. El crecimiento en la energía de aceleración de haces hasta mediados de los años ochenta y las numerosas familias de aceleradores se muestran en la gráfica 20.2.

Los dos complejos de investigación de aceleradores más importantes de la temprana posguerra emergieron como consecuencia directa de los esfuerzos bélicos. El Laboratorio Nacional Brookhaven (BNL), que sobre todo da servicio a universidades del noreste de los Estados Unidos, fue equipado con varios aceleradores, siendo el más potente el Cosmotrón. Este sincrotrón de protones de 3 GeV se basó en el concepto de la estabilidad de fase que describió Edwin McMillan en 1945, y que fue sugerida de ma-

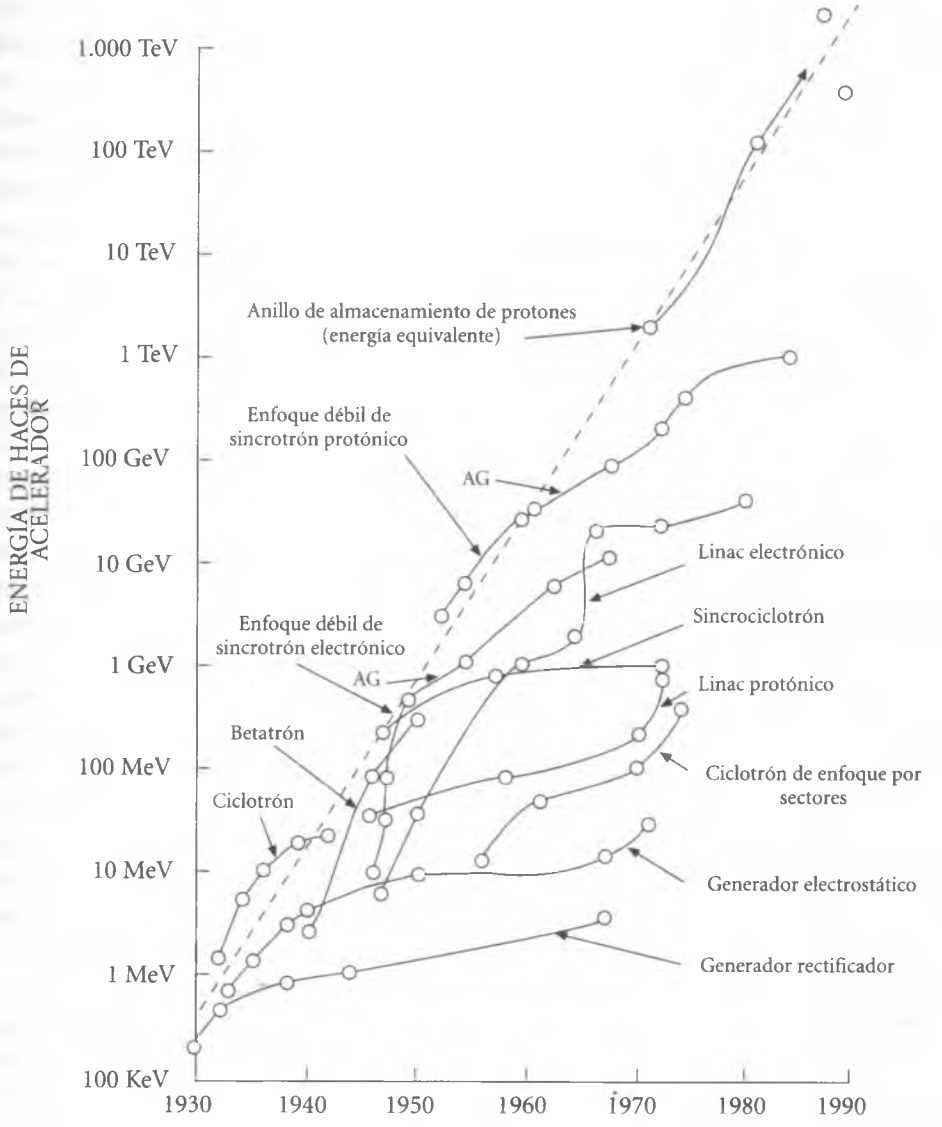


Gráfico 20.2. Crecimiento de energía de haces de acelerador con el tiempo, 1930-1984. *Fuente*: Reproducido con permiso de *Physics Through the 1990s: Elementary-Particle Physics*. © 1986 por National Academy of Sciences, cortesía de National Academy Press, Washington, D.C.

nera independiente por Vladimir Veksler en la Unión Soviética. El otro centro de aceleradores más importante estaba en la Costa Oeste, en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California, más tarde conocido como el Laboratorio de Radiación Lawrence (LRL). Allí se construyó un sincrotrón aun más potente, el Bevatrón de 9 mi-

llones de dólares, que en 1954 aceleró protones hasta una energía de 6,2 GeV. El Cosmotrón y el Bevatrón dominaron las primeras fases de la física de altas energías apoyadas en la aceleración, promoviendo importantes descubrimientos, como la producción en parejas de partículas extrañas en 1953 y el antiprotón en 1955. Sincrotrones convencionales más potentes que estas máquinas serían prohibitivos por su precio, pero un nuevo tipo de acelerador, la máquina de gradiente alternante, se mostró como un merecido sucesor. El AGS Brookhaven (Alternating Gradient Synchrotron) de 1960 usaba un principio llamado de enfoque fuerte y se convirtió en el siguiente acelerador estadounidense altamente exitoso. Fue alcanzado por el sincrotrón de protones (PS) diseñado independientemente por el CERN, siendo una máquina de 30 millones de dólares completada en 1959 que podía acelerar protones a 28 GeV. Un acelerador de protones aun más potente se construyó en el centro Serpukhov en Rusia. Con una energía de 76 GeV en sus comienzos de 1971 fue, durante un breve periodo, el mayor acelerador del mundo.

En 1957, los físicos de Stanford propusieron al AEC, al DOD y a la NSF construir un nuevo acelerador lineal de partículas, un desarrollo ulterior de un tipo de acelerador lineal (o «linac») ya operativo en Stanford. La máquina propuesta era más que la continuación de un programa existente, era un paso hacia un nuevo rango de la gran ciencia. El acelerador, en su época el mayor instrumento científico de la historia, iba a tener 3,2 km de largo, y su coste de construcción se estimó en 78 millones de dólares. Si no hubiera sido por el impacto del *Sputnik,* puede que no se hubiera continuado con el proyecto, que sólo tenía justificación por su valor en la física de alta energía. Eisenhower quería demostrar la fuerza científica estadounidense y en una charla de 1959 precisamente denominada «La ciencia, sierva de la libertad» dio apoyo al proyecto y decidió pedir al Congreso hasta 100 millones de dólares para llevarlo a cabo. El camino por el Congreso fue de todo menos fácil, y a muchos les parecía, tanto a políticos como a científicos, que el proyecto era simplemente demasiado costoso como para amortizarlo sólo por sus méritos científicos. «¿Cuál será el resultado práctico de este acelerador?», preguntó un congresista. «¿Cuáles son las proyecciones de poner en uso el conocimiento que obtendremos del acelerador en un uso práctico? ¿De qué modo subirá el nivel de vida de nuestra gente?» (Wang 1995, p. 354). La respuesta sin duda fue que el SLAC –Stanford Linear Accelerator Center (Centro de Aceleración Lineal de Stanford)– no aumentaría el nivel de vida. Sin embargo la propuesta se aprobó consiguiendo en 1961 114 millones de dólares, firmándose un contrato el año siguiente entre Stanford y el AEC. Bajo el mando de Wolfgang Panofsky, el SLAC estaba listo y operativo en 1966. Incluso aunque el centro de aceleración no aumentara el nivel de vida de la mayoría de los estadounidenses, consiguió obtener un éxito tremendo desde un punto de vista científico. Como veremos en los dos siguientes capítulos, el SLAC fue de una importancia crucial para la nueva física de altas energías de la década de 1970.

Los planes para construir un acelerador estadounidense aun más potente que el Bevatrón, el AGS Brookhaven y el Sincrotrón Serpukhov, empezaron al principio de los años sesenta. Iba a ser, como casi todos los aceleradores, financiado por el AEC, una

institución que en 1964 gastó 135 millones en física de altas energías. Por ser un gasto sin precedentes el de la nueva máquina, sólo se podía construir una, lo cual provocó grandes controversias entre los grupos en Berkeley y Brookhaven. Después de mucha discusión de dónde localizar el centro norteamericano de aceleración del futuro, Batavia, en Illinois, ganó a Berkeley y Brookhaven. En 1967, el presidente Johnson firmó la propuesta de ley para el Laboratorio del Acelerador Nacional, o Fermilab (FNAL), proyecto de 250 millones de dólares alrededor de un acelerador de 200 GeV. Bajo el liderazgo de Robert Wilson, primer director del Fermilab, este inmenso proyecto fue completado en 1972. En cuestión de meses, Wilson forzó al acelerador a producir un haz de protones de 400 GeV, que era con diferencia la mayor energía producida en un laboratorio. Pero esto no era todo. El método de almacenamiento de rayos en órbitas fijas para posteriormente hacerlas colisionar fue realizado por primera vez en 1959 con rayos electrón-electrón (Stanford) y en 1963 con rayos de electrón-positrón (Orsay, zona de París). Colisionadores electrón-positrón ulteriores y con más potencia y de gran valor científico, fueron construidos en el SLAC en 1972 (llamado el SPEAR) y en el CERN en 1989 (llamado el LEP). El acrónimo LEP es por *Large Electron Positron collider*, o Gran Colisionador Electrón-positrón, y con su anillo de 27 kilómetros de largo, sin duda era una máquina grande. Los colisionadores protón-antiprotón se desarrollaron en paralelo con los de electrón-positrón y condujeron hasta el colisionador SPS *(Super Proton Synchrotron)* del CERN con el cual se podía obtener una energía de 500 GeV. La respuesta americana fue el Tevatrón del Fermilab, que empezó a operar en 1985, haciendo uso avanzado de imanes superconductores para empujar los protones a lo largo de su anillo de 6,3 kilómetros. El nombre de la máquina se refería a su máxima energía de un teraelectronvoltio, 1 TeV = 1.000 GeV. En 1987 los japoneses se unieron a la carrera hacia energías mayores con el colisionador TRISTAN, un colisionador electrón-positrón con rayos de hasta 30 GeV, construido en el Laboratorio Nacional de Física de Altas Energías (KEK) cerca de Tokio. La tabla 20.1 resume la evolución de los aceleradores entre 1946 y 1985.

Muchos físicos sintieron, y seguramente todavía sientan, que una instalación verdaderamente internacional de aceleración de partículas sería la elección más racional, en un campo que es, después, de todo internacional. ¿Por qué no evitar la ridícula y costosa competitividad entre naciones y trabajar juntos? La idea de un «acelerador mundial para la paz mundial» se debatió por primera vez entre físicos estadounidenses, soviéticos y europeos. La idea –de construir un acelerador internacional de 1 TeV con un coste de unos mil millones de dólares– presuponía que fuera a liderar no sólo grandes resultados científicos sino también, y no era menos importante, crear un clima de paz. Según Robert Wilson, uno de los físicos destacados detrás de la idea del acelerador mundial, «la mayor fuerza de tal laboratorio internacional será la de desarrollar nuestra cultura común en la ciencia física [...] partículas, aceleradores y la sociedad podría interaccionar de nuevo –esta vez para proveer de una fuerza para la armonía internacional–» (Kolb y Hoddeson 1993, p. 106). El laboratorio mundial siguió siendo discutido durante varios años y en los setenta la idea fue actualizada hacia una máqui-

TABLA 20.1
El auge de la gran ciencia en la física de altas energías

Nombre o tipo	*Localidad*	*Energía (GeV)*	*Año de puesta en marcha*
Sincrociclotrón	Berkeley	0,35	1946
Cosmotrón	BNL	3	1952
Bevatrón	Berkeley	6,2	1954
Sincrotrón de protones	Dubna (URSS)	10	1957
PS	CERN	28	1959
AGS	BNL	33	1960
Sincrotrón de protones	Serpukhov	76	1971
Sincrotrón de protones	FNAL	400	1972
SPS	CERN	400	1976
Tevatrón	FNAL	1.000	1985

Nota: Aceleradores de protones seleccionados 1946-1985. Debido a los diferentes principios detrás de los aceleradores, sus energías no pueden ser comparadas directamente.

na de 10 TeV. Era la idea favorita entre muchos físicos que querían combinar objetivos científicos que merecieran la pena con objetivos importantes en política y ética. Pero esta idea romántica nunca pasó del nivel del debate y, a pesar de toda la retórica política sobre el internacionalismo en la ciencia, no fue realista.

Sintiendo que la iniciativa en física de altas energías estaba encaminada a ser dominada por Europa, los físicos estadounidenses sugirieron en 1983 construir la instalación definitiva en aceleración basada en un SSC, Supercolisionador Superconductor *(Superconducting Supercollider)*. Llamamientos de sentimiento nacionalista estaban entre los argumentos de los físicos de altas energías que estaban a favor del SSC. Sheldon Glashow y Leon Lederman, dos de los físicos de partículas más destacados, argumentaban de la siguiente manera: «Cada vez más, los logros americanos o bien se quedan en el presente perfecto u oscilan hacia el futuro condicional, mientras que los europeos persiguen el presente de indicativo [...] Nuestra preocupación es que si dejamos pasar la oportunidad que el SSC ofrece para los años noventa, la pérdida será no sólo en nuestra ciencia, sino también en el hecho más amplio del orgullo nacional y la confianza en nuestra propia tecnología» (*PT*, marzo 1985, p. 34). La denominación de SSC no era exagerada: con una energía de colisión de protones de unos 40 TeV (ó 40.000 GeV), y un anillo subterráneo de 83 km de circunferencia, iba a ser realmente una supermáquina; el sistema superconductor magnético planeado incluía 41.500 toneladas de hierro y 2 millones de litros de helio líquido. Los gastos, estimados en 1990 en unos 10 mil millones de dólares, también iban a ser *súper*. Iba a ser la instalación mayor y más cara construida jamás. El proyecto gigante estaba apoyado por el presidente Reagan y en 1988 se anunció su localización en Waxahachie, pequeña localidad de Texas. También al siguiente presidente, el tejano George Bush, le gustaba el proyec-

to, al cual comparó –en un raro ejercicio de inspiración poética– como «el Louvre, las pirámides y las cataratas del Niágara todas en uno» (Kevles 1997, p. 292).

Existían buenas razones científicas para construir el SSC, pero para una inversión de tales dimensiones, las razones científicas no bastaban. Entre otras razones aducidas por los propulsores del SSC se usó la sugerencia engañosa de que el trabajo con imanes superconductores podría ayudar al desarrollo de técnicas médicas que podrían probarse útiles en la lucha contra el cáncer. Como en algunos casos anteriores de proyectos de grandes de aceleradores, la oposición al SSC no venía sólo de entre los políticos, sino también entre físicos y otros científicos que argumentaban que la física de altas energías estaba sobre-subvencionada y que se obtienen unos beneficios mucho mayores, tanto científicos como tecnológicos, al invertir más dinero en otros campos de la ciencia. Uno de los críticos fue Philip Anderson, el teórico del estado sólido y posteriormente premio Nobel, que ya en 1971, sugirió que «la tarta es finita y lo que es "pro" altas energías es "anti" otros, por lo que es obvio ahora que si queremos mantener una ciencia saludable, debemos lanzar una mirada crítica a todas sus divisiones». Anderson no sólo expresó dudas hacia los esperados resultados derivados supuestos de la física de altas energías, sino que también objetaba a «la justificación intelectual de física de partículas elementales como la única dirección en la cual las verdades "realmente fundamentales" o "intensivas" han ser descubiertas» (Anderson 1971). Veinte años más tarde, Anderson reforzó su crítica contra el proyecto SSC. Naturalmente sus argumentos fueron atacados por los defensores del SSC, incluyendo a Leon Lederman, Steven Weinberg y otros popes de la comunidad de físicos de altas energías. El trabajo alrededor del SSC continuó por un tiempo, pero en 1992 el proyecto se encontró con muy serias dificultades. Al final fue rechazado en 1993 después de haber gastado casi dos mil millones de dólares. La razón del rechazo fue tanto política como económica. Diez mil millones de dólares era, después de todo, una cantidad asombrosa de dinero para gastar en satisfacer la curiosidad de un pequeño grupo de físicos de altas energías. Bajo distintas condiciones políticas, el proyecto podría haber sido aceptado, sobre todo si se hubiera relacionado con cuestiones de seguridad nacional. Pero no se conectó con ningún valor militar en particular y, en cualquier caso, era mala época para el proyecto: en 1992, la Guerra Fría había terminado y la Unión Soviética ya no existía.

Uno de los efectos del nuevo tipo de gran ciencia que floreció en los años cincuenta fue un cambio destacado del papel del físico, partiendo de ser un investigador individual a ser una pequeña rueda en un esfuerzo de investigación conjunto. El físico ya no investigaba para él mismo, sino que participaba en un proyecto de investigación. Fue un salto que muchos físicos de la vieja escuela odiaron. Uno de ellos era Percy Bridgman, premio Nobel y filósofo de la ciencia que arguyó que el nuevo estilo de física iba en detrimento de las ideas creativas y de la libertad intelectual. Dos décadas después, ésta sería una crítica repetida y reforzada por una generación más joven de físicos. Bridgman atribuyó este estilo a la estructura de investigación creada durante la guerra, cuando los jóvenes científicos que «nunca habían experimentado el trabajo independiente y no sabían lo que era» se unieron a los grandes proyectos de investiga-

ción. «El resultado», escribió Bridgman, «es que está creciendo una generación de físicos que nunca han ejercitado ningún grado específico de iniciativa individual, que no han tenido la oportunidad de experimentar sus satisfacciones o sus posibilidades, y que consideran el trabajo cooperativo en grandes equipos como lo normal [...] El temperamento de la generación emergente es reconociblemente diferente de aquél de la anterior» (Bridgman 1950, p. 299). La gran ciencia abrigaba, y por tanto demandaba, un espíritu cooperativo así como corporativo desconocido en los años veinte, cuando Bridgman realizó sus trabajos más importantes.

No sólo había poco espacio para el individualismo en los experimentos a gran escala, sino que los instrumentos más caros también parecía que tenían vida propia, y se convirtieron en más importantes que los físicos que trabajaban con ellos. ¿Fueron las máquinas monstruos creados por físicos Frankenstein? La relación cambiada entre físicos y máquinas fue enunciada sin intencionalidad por el director del Cosmotrón Brookhaven, Samuel Goudsmit (que, como Bridgman, era un premio Nobel que inició su carrera en los años veinte). En un memorando interno de 1956, Goudsmit enfatizó, «en esta nueva forma de trabajo experimental las habilidades deben ser complementadas por rasgos de personalidad que realcen y alimenten la muy necesitada lealtad cooperativa», prosiguiendo, «siendo un gran privilegio trabajar con el Cosmotrón, siento ahora que debemos negar su uso a cualquiera cuya estructura emocional pueda ir en detrimento del espíritu cooperativo, no importa cómo de bueno sea como físico... Me reservo el derecho de negar el trabajo experimental en altas energías a cualquier miembro de mi personal que piense que no esté capacitado para la colaboración en el grupo. Debo recordarle que después de todo, no es usted sino la máquina la que crea las partículas y hechos que está usted investigando con tanta pasión» (Heilbron 1992, p. 44). Los peligros –y quizá la esencia de la física de la gran ciencia– no se pudo expresar de manera más afinada.

Una aventura europea de gran ciencia

Alrededor de 1950, cuando la física nuclear y de partículas empezaron a verse dominadas por los aceleradores, Europa se mantenía en una posición muy por detrás de los Estados Unidos. En esa época, las primeras iniciativas para organizar un proyecto de investigación conjunta europea tomó cuerpo con el físico francés Pierre Auger y el italiano Edoardo Amaldi entre los primeros. El resultado de numerosas y difíciles negociaciones fue el nacimiento provisional del CERN (Conseil Européen pour le Recherche de Nucléaire) en 1952 y el establecimiento de una organización permanente en 1954. La iniciativa era mayoritariamente francesa e italiana, mientras que la respuesta de la principal nación europea en ciencia, Reino Unido, fue tibia. Los británicos tenían su propio acelerador, un sincrotrón de 400 MeV en Liverpool, y no tenían confianza en el grandioso plan continental, el cual fue descrito por Blackett como «bastante loco». Además, no había interés en Inglaterra por la cooperación europea, y menos aún por la unidad europea. Al principio, el gobierno británico declinó participar y sólo se unió por completo en 1954. Alemania, o más bien la nueva República Federal

Alemana, presentaba otro problema político, entre otros motivos porque todavía no era miembro de la UNESCO. La fundación del CERN se veía no sólo como un proyecto científico, sino también como un proyecto político, fundamentalmente un modelo para la cooperación europea. Para Heisenberg y otros físicos alemanes, además era una manera de rehabilitar a los físicos alemanes después de la guerra y de olvidar el pasado nazi. En 1956, las naciones del CERN incluían a Bélgica, Dinamarca, Alemania Occidental, Francia, Grecia, Italia, Países Bajos, Noruega, Suecia, Suiza, Inglaterra y Yugoslavia. Las mayores contribuciones venían de Francia y de Inglaterra (un 24 por 100 aproximado cada uno), seguidos de Alemania e Italia (18 y 10 por 100 respectivamente).

El propósito del CERN era «dotar de colaboración entre Estados europeos en investigación nuclear de carácter puramente científico y fundamental y en la investigación esencialmente relacionada con ella». La espina dorsal de la colaboración estaba planeada que fuera el mayor acelerador del mundo, el cual en 1954 significaba uno con más de 6 GeV de potencia. Se mencionaba específicamente que «la organización no estará preocupada por trabajos para requerimientos militares y los resultados de su experimentación y sus trabajos teóricos serán publicados o, de otro modo, hechos accesibles en general». Desde luego, una de las mayores diferencias entre la física de altas energías y en general los proyectos de la gran ciencia, eran los muy distintos roles jugados por las fuerzas armadas. Desde luego, una de las razones para la indiferencia con la cual las estructuras militares europeas miraban al CERN era que no había una milicia europea. Las diferentes fuerzas armadas de Europa no tenían ninguna tradición de apoyo a gran escala de la ciencia básica, y ningún interés en una organización multinacional como el CERN. Para subrayar el proyecto del CERN como no militar y apolítico, se decidió no incluir ningún reactor nuclear y situar el laboratorio cerca de Ginebra, en la neutral Suiza. En la primera fase del proyecto, se consideró Copenhague, pero Bohr y Kramers, sus principales activos, no lo consiguieron.

El primer proyecto principal, el sincrotrón de protones, se pensó en origen como una versión extrapolada del Cosmotrón Brookhaven. En 1954, se planeó tener una energía de unos 30 GeV y su coste estaba estimado en 16 millones de dólares, alrededor de la mitad del coste real. La máquina se completó de acuerdo a su planificación y durante los años sesenta el laboratorio se expandió con nuevos y más grandes aceleradores y sistemas de detección. Era un proyecto de gran ciencia desde su propio comienzo y creció más y más. Por ejemplo, en 1955, el presupuesto era de 64 millones de francos suizos (MSF) o unos 16 millones de dólares, y el personal consistía en 144 personas. Diez años más tarde, el presupuesto se incrementó a 275 MSF y el personal a 2.251 personas y, en 1975, el presupuesto era de 844 MSF, el personal de 3.788 personas. Además, el número de científicos visitantes se incrementó sostenidamente desde 21 en 1955, 315 en 1965 y 1.289 en 1975. El personal administrativo y técnico se incrementó aun más rápido que el número de científicos (véase tabla 20.2).

Aunque el proyecto conjunto europeo fue un éxito en muchos sentidos, al principio no lograba retar seriamente el liderazgo americano en física de altas energías. La mayoría de las veces, los laboratorios de aceleradores estadounidenses eran los prime-

ros en sacar a la luz importantes descubrimientos que típicamente se veían confirmados por los europeos en un corto lapso de tiempo. Los primeros diez o quince años fueron esencialmente un periodo de aprendizaje para los físicos del CERN, la mayoría de los cuales no estaban acostumbrados a realizar experimentos de gran ciencia a la americana. En los Estados Unidos, los experimentos de aceleradores a gran escala, el espíritu emprendedor y la cercana cooperación entre experimentadores, teóricos, administradores e industria ya existían desde los años treinta y esa tradición se reforzó sobre todo por los proyectos militares durante la guerra. Cuando los físicos europeos aprendieron por primera vez los nuevos métodos de hacer y de organizar la física, el CERN se convirtió en una institución competitiva con los mejores laboratorios americanos. Sin duda, después de unos treinta años de dominación masiva americana en física de partículas, al final de los años setenta, el equilibrio de poder cambió y los laboratorios de física de altas energías empezaron a tomar el relevo (gráfico 20.3). El cambio ha sido documentado a través de datos bibliométricos. Por ejemplo, mientras que el 53 por 100 de todas las publicaciones de física experimental de altas energías se originaron en los laboratorios de los Estados Unidos en 1970 y sólo el 36 por 100 en Europa, en 1982, los números eran del 35 por 100 en Estados Unidos y el 56 por 100 en Europa. Los datos correspondientes para el número medio de citas por artículo científico eran de 3,3 (EEUU) y 2,9 (Europa) en 1970, y de 3,0 (EEUU) y 3,9 (Europa) en 1982. Los principales competidores durante los años setenta eran el Fermilab y el CERN. Mientras que el Fermilab se ganaba casi la cuarta parte de todas las citas en física experimental de altas energías en el periodo 1973-1976, el porcentaje cayó al 9,3 por 100 durante 1981-1984. Durante el último periodo de cinco años más del 15 por 100 de las citas eran sobre artículos originados en el programa SPS del CERN. En 1984, el número medio de citas de artículos originados en el colisionador del CERN era de 24, un número muy alto, lo cual indica un valor científico elevado.

Al final de 1997, cuatro años antes del deceso del SSC, los Estados Unidos llegaron a un acuerdo con el CERN para participar en la construcción y uso del futuro gran colisionador de hadrones, *Large Hadron Collider* (LHC) y sus detectores de partículas asociadas. Los americanos estuvieron de acuerdo en contribuir con 531 millones de

TABLA 20.2
Distribución del personal del CERN

Categoría	*1955*	*1960*	*1965*
Científicos e ingenieros	83	170	349
Técnicos	102	527	604
Personal auxiliar	35	241	871
Personal administrativo	49	127	316
Miembros visitantes	18	71	73

Nota: Basado en datos de Hermann *et al.*, pp. 396-398.

dólares. El LHC, previsto para operar en 2005, tiene un coste estimado de 6.000 millones de dólares y será el acelerador más potente del mundo. La última fase de la historia de la física de aceleradores demuestra que el centro de la física de altas energías se ha trasladado definitivamente a Europa. También demuestra que la gran física de partículas internacional no feneció a la vez que el proyecto SSC. Aunque sea un proyecto europeo, el LHC no está confinado a los países miembros del CERN, sino que arrastra una cooperación de cuarenta y cinco países diferentes. En algún sentido, es la puesta en marcha del viejo sueño de un «acelerador mundial».

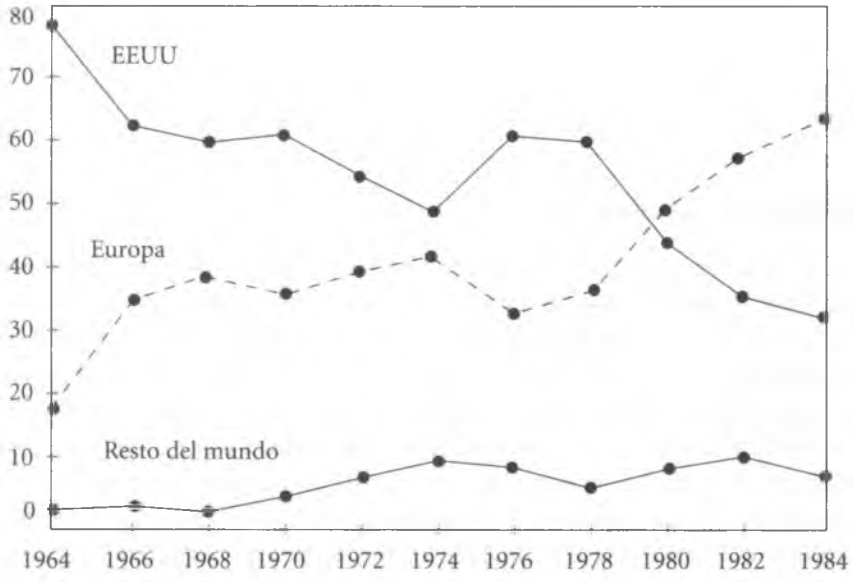


Gráfico 20.3.3 Porcentaje de citas de artículos de física de altas energías publicados en un año dado y en los tres años previos, por región y por año. *Fuente:* Redibujado a partir de Irvine *et al.*, 1986.

CAPÍTULO 21

Descubrimientos de partículas

Principalmente mesones

En 1948, la física de partículas elementales no existía todavía como disciplina, y el término de física de altas energías no había entrado en el vocabulario de los físicos. El estudio de los nucleones, mesones y otras partículas elementales era visto como parte de la física nuclear y las actividades del campo eran enmarcadas a menudo en nuevos laboratorios e institutos dedicados a los «estudios nucleares». Con el reconocimiento en 1947 de que el mesón-π de Yukawa era muy distinto del mesón-μ del rayo cósmico, todo estaba dispuesto para la investigación de partículas aun más novedosas, y finalmente para la emergencia de una subdisciplina científica madura de la física de partículas. En su monografía de 1949, *Teoría del núcleo atómico y fuentes de energía nuclear (Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy Sources)*, George Gamow y Charles Critchfield sugirieron «un nexo conveniente, incluso a pesar de no estar definido con mucha precisión, entre la *física nuclear genuina* y la siguiente, aunque todavía bastante inexplorada, división de la ciencia de materiales, que podría denominarse en principio la *física de las partículas elementales*» (en cursiva en el original). Mientras que en los ocho primeras conferencias anuales de Rochester, desde 1950 a 1957, trataban tanto de la física de mesones como de la física nuclear de altas energías, su continuación en Ginebra en 1958 dejó caer lo «nuclear» y se convirtió en una conferencia sobre «física de altas energías». En aquella época, existía una necesidad de mayor coordinación internacional, de las numerosas conferencias sobre física de altas energía. La Asamblea General de la IUPAP en 1957 estableció la Comisión de Física de Altas Energías. En la primera comisión estaban Robert Marshak y Wolfgang Panofsky de Estados Unidos, Cornelis Bakker y Rudolf Peierls de Europa e Igor Tamm y Vladimir Vekslar de la Unión Soviética.

En los primeros años cincuenta, una confianza creciente en el instrumental complicado, potente, sofisticado y caro precipitó la transformación del subcampo en la

gran ciencia de la física de altas energías. El subcampo se caracterizó enseguida, como se describe en el capítulo 20, por las enormes subvenciones gubernamentales y las colaboraciones que muchas veces afectaban a docenas de investigadores. En 1950, cuando el número de partículas y antipartículas elementales detectadas y predichas se mantenía en unas veinte, la radiación cósmica era aún la principal fuente de partículas, pero unos pocos años después, la nueva generación de aceleradores y detectores cambió la situación de modo significativo. La primera partícula que fue descubierta artificialmente, producida en un acelerador en vez de ser encontrada en la naturaleza, fue el pión neutro. La existencia de una mesón Yukawa había sido propuesta ya en 1938 por el físico germanobritánico Nicholas Kemmer, y en 1947 Oppenheimer sugirió que la partícula hipotética se desintegraría muy rápidamente en dos rayos gamma. La partícula se detectó por primera vez en el sincrotrón de Berkeley en 1950 y fue identificada por la conversión de rayos gamma en pares de electrones ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ seguido de $\gamma \rightarrow e^+ e^-$) Poco tiempo después, los físicos británicos encontraron la partícula en la radiación cósmica. (Desde un punto de vista más filosófico, no es obvio en qué momento un objeto pertenece a la naturaleza y cuándo es producido artificialmente. Se puede argumentar que el electrón que aparece en el tubo de rayos catódico de J. J. Thomson fue la primera partícula elemental producida.)

La primera evidencia de un mesón pesado se comunicó antes del descubrimiento del pión. En 1944, los físicos franceses Louis Leprince-Ringuet y Michel l'Heritier publicaron en *Comptes Rendus* un artículo sobre la «Posible existencia de una partícula de masa 990 m_o en la radiación cósmica», posiblemente lo que se llamó posteriormente un mesón *k* o kaón. En cualquier caso, no llamó mucho la atención este evento por sí solo, y los franceses no fueron reconocidos como sus descubridores. Después de la guerra, los mesones pesados fueron descubiertos por primera vez por dos físicos de Manchester, Clifford Butler y George Rochester, quienes en octubre de 1946 –alrededor de un año antes de descubrirse el pión–, encontraron un proceso en forma de V en la radiación cósmica en su cámara de niebla. Lo interpretaron como resultado de la desintegración de una partícula neutra pesada. Otro proceso V obtenido a partir una partícula cargada fue detectado en 1947, pero no fue hasta 1950 cuando los descubrimientos fueron confirmados por más observaciones. Éstas fueron realizadas por Carl Anderson en Caltech, que obtuvo numerosos procesos V. En 1952, las partículas V estaban firmemente normalizadas y se reconocía que las había de cuatro tipos. Robert Thompson, de la Universidad de Indiana, mostró las partículas neutras como desintegrables en $p\pi^-$ ó $\pi^- \pi^+$, llamándolas Λ y θ, respectivamente (o V^o_1 y V^o_2). Se encontraron muchas más desintegraciones, algunas de ellas sospechosas de pertenecer a partículas no conocidas hasta entonces. Para poder comparar las distintas observaciones, determinar el número de partículas comparadas con las desintegraciones y estandarizar la nomenclatura, se organizaron conferencias en Estados Unidos y en Europa. En una reunión en Francia en 1953, el Congreso Internacional de Radiación Cósmica sugirió dividir las partículas extrañas en grupos, por un lado los mesones *K* o pesados con masa menor que el nucleón y por otro los hiperones con masa mayor que el nucleón pero más pequeña

TABLA 21.1.
Partículas extrañas como eran conocidas sobre 1957

Clase	*Símbolo(s)*	*Masa* (m_e)	*Tiempo de vida (segundos)*	*Extrañeza*
Mesones K	K^+	966,5	$1{,}2 \times 10^{-8}$	+1
	K^-	966,5	$1{,}2 \times 10^{-8}$	−1
	K_1^o	965	$\sim 10^{-10}$	(+1)
	K_2^o	965	$\sim 10^{-7}$	(+1)
Hiperones	Λ (V_1^o)	2.182	$3 - 10^{-10}$	−1
	$\Sigma^+(V_1^+)$	2.327	$0{,}7 \times 10^{-10}$	−1
	$\Sigma^-(V_1^-)$	2.343	$1{,}5 \times 10^{-10}$	−1
	Σ^o	2.325	$< 10^{-10}$	−1
	Ξ^-	2.585	$\sim 2 \times 10^{-10}$	−2

que el deuterón. Los mesones *L* o ligeros incluían piones y muones. La tabla 21.1 resume las nuevas partículas tal como se conocían en 1957. En ese año, todo lo relativo al número y clasificación de las partículas estaba evolucionando y algunas partículas iguales tenían varios nombres y símbolos.

Mientras que la mayoría de las nuevas partículas «extrañas», como se denominaron después, estaban identificadas originalmente con la radiación cósmica, a partir de 1953 los grandes aceleradores iban dominando *in crescendo* el campo; y mientras que los descubrimientos pioneros habían sido realizados por físicos franceses y británicos, a partir de esa época, el campo lo dominaron los científicos estadounidenses. El Cosmotrón de 3 GeV en el Laboratorio Nacional de Brookhaven empezó a producir haces de piones en 1953, y en 1954 el Bevatrón en el Laboratorio de Radiación en Berkeley produjo rayos de hasta 6 GeV. Los aceleradores anunciaron una nueva era en la joven ciencia de la física de altas energías.

No menos importante que los aceleradores fueron los nuevos métodos introducidos para detectar procesos de interacción entre partículas. En la primera fase de la física de altas energías, la cámara de niebla fue el detector preferido, la cual fue desarrollada en los primeros años cincuenta en varias versiones especiales, adecuadas para experimentos en aceleradores (alta presión y cámaras de difusión de niebla). Al mismo tiempo, se generalizó el uso de nuevos tipos de emulsiones fotográficas. El método de la emulsión nuclear fue desarrollado en los años treinta, en concreto por la física nuclear vienesa Marietta Blau, pero no fue sino después de la guerra cuando este método resultó ser de importancia decisiva en física de partículas. Esto fue el resultado de la cooperación entre los físicos de rayos cósmicos británicos e Illford, Ltd.

Los métodos tradicionales, de bajo coste, como las cámaras de niebla y las emulsiones, fueron suplidos y reemplazados por la técnica de la cámara de burbujas inventada por Donald Glaser en la Universidad de Michigan en 1952. La invención de Glaser se convirtió pronto en un instrumento versátil, en concreto por Luis Alvarez y su

grupo de Berkeley. Las cámaras de burbujas con hidrógeno líquido como fluido de trabajo se demostraron idóneas para su uso con aceleradores y fueron usadas de manera general a partir del final de la década de 1950. Diferían de los sistemas de detección no sólo en su técnica, sino también en su tamaño, coste y complicado manejo; eran un tipo de detector que los pequeños laboratorios ni podrían permitirse ni hacer mucho uso de él; en otras palabras, un detector «no democrático». La cámara de burbujas de hidrógeno de 183 cm de Alvarez de 1959 costó 2 millones de dólares, y necesitaba de un ordenador de un millón de dólares para analizar los datos. Ya en el año 1957, se construyó la primera máquina lectora que podía seguir y medir trazas de manera automática. Fue desarrollada por Jack Franck, un ingeniero de Berkeley, y apodada acertadamente como «Franckenstein». Las fotografías de cámaras de burbujas se convirtieron en una pequeña industria. Se estimó que en 1967 unos dos millones de eventos de cámaras de burbujas eran medidos cada año. En el experimento de 1964, que sirvió para descubrir el hiperón Ω^- (véase a continuación), unas 100.000 fotos fueron tomadas y parcialmente analizadas.

Muy poco después del descubrimiento de las primeras partículas pesadas, los físicos empezaron a preguntarse cómo entenderlas de manera teórica, lo cual significaba clasificarlas inicialmente en familias. Un problema muy discutido fue el de la relación entre la producción y la desintegración de las nuevas partículas, indicando que estaban interactuando de manera fuerte, pero tenían tiempos de vida que no coincidían con desintegraciones fuertes. Debido a esta conducta desconcertante, se denominaba a estas partículas como «extrañas». En 1951, Abraham Pais, e independientemente un grupo de físicos japoneses, sugirieron la idea de una producción asociada, la cual implicaba que las partículas *V* sólo se podrían producir en parejas. Pais presentó un tipo de número cuántico, análogo a la paridad, para explicar las desintegraciones observadas y no observadas. El número cuántico de Pais era multiplicativo y funcionaba como una regla de selección, no siendo distinto a los números cuánticos presentados en la primigenia teoría cuántica con el objetivo de encontrarle una lógica a los espectros ópticos. Su propósito era actuar como un principio de ordenación a través de la colección de nuevas partículas en grupos o familias. En su artículo de 1951, Pais mencionó que «la búsqueda de los principios ordenantes en este momento puede al final ser asimilada al intento de un químico de construir la tabla periódica si sólo tenemos una docena de elementos sin relación entre sí» (Pais 1986, p. 519). Pudo haber sido la primera vez, pero desde luego no ha sido la última en la que las reglas de una clasificación en particular han sido descritas como análogas al sistema químico de Mendeleiev. A pesar de la popularidad de la analogía, ésta estaba fundamentalmente equivocada. Los físicos de partículas no estaban sólo metidos en un juego de ordenar partículas, también querían entenderlas como manifestaciones de unas pocas partículas de verdad fundamentales, como los quarks. Sus esquemas de clasificación estaban guiados por nociones teóricas y expresados en el lenguaje de la física matemática; a este respecto, su trabajo difería radicalmente del de Mendeleiev. El químico ruso planeó su famosa tabla periódica de manera puramente empírica, como una clasificación racional de las pro-

piedades físicoquímicas conocidas de los elementos. Al contrario que algunos otros químicos de la época, avisó contra una concepción del sistema como reflejo de algún tipo de armonía subatómica interna entre los elementos.

Un esquema de explicación mejorada de las partículas fuertemente interaccionantes fue desarrollado pronto por Murray Gell-Mann, de veintiséis años, en la Universidad de Chicago, y también por Kazuhiko Nishijima y Tadao Nakano en Japón. Gell-Mann presentó un número cuántico aditivo, al cual llamó «extrañeza» (o *strangeness*, *S*) –un nombre que databa de otoño de 1953– y que era el cero para piones, muones y nucleones pero no cero para las nuevas partículas extrañas. Por ejemplo, al K^+ se le asignó $S = +1$ y al se le asignó $S = -1$. En todas las interacciones fuertes, la extrañeza quedaría inalterable, y de este modo el concepto funcionaría como una guía por la cual las reacciones podrían ocurrir o no. Una reacción como $\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$ no estaba permitida, porque infringiría la conservación de la extrañeza (al modificar *S* de 0 a -2). Varias predicciones de la teoría de Gell-Mann-Nishijima fueron verificadas por los experimentos, y en 1960 la idea de extrañeza, aunque no bien entendida desde el punto de vista teórico, estaba firmemente establecida como la idea más útil en la jungla de las partículas elementales. La teoría implicaba una reclasificación controvertida de los mesones *K* neutros, los cuales debían entenderse ahora, según Pais y Gell-Mann, como una mezcla de K^o y su antipartícula, siendo esto distinto de K^o y con extrañeza opuesta. K^o y $\bar{K}^o$ estaban conectadas a través de interacciones débiles y las partículas desintegradas se interpretaban como una «mezcla» o superposición de K^o y $\bar{K}^o$ con distintas desintegraciones. La K_1^o era conocida por desintegrarse en dos piones y la K_2^o de larga vida se suponía que se desintegraba en tres partículas. Esta presunción se confirmó en 1956, cuando el K_2^o se observó por primera vez en un experimento en el Cosmotrón Brookhaven.

Mesones, hiperones y partículas de resonancia no fueron las únicas partículas nuevas de los años cincuenta. El antiprotón, predicho por Dirac en 1933, había sido largo tiempo esperado, e incluso hubo informaciones de su descubrimiento en algunas ocasiones. Por ejemplo, los científicos soviéticos afirmaron en 1946 haber detectado la partícula en la radiación cósmica, pero ni esta ni otras afirmaciones realizadas antes de 1955 fueron aceptadas. Para producir antiprotones por colisiones de materia-protón, la energía de los protones debía ser de al menos 5,6 GeV. La máxima energía obtenida con el Bevatrón de 10.000 toneladas y casi diez mil millones de dólares era de 6,2 GeV, muy por encima de la energía umbral. Aunque el Bevatrón era una máquina ideal de antiprotones, no se construyó con el antiprotón en mente, y no fue sino hasta 1955 en que se usó para producir dicha partícula. La detección de un antiprotón se consiguió por vez primera en el otoño de 1955 por los físicos de Berkeley Owen Chamberlain, Emilio Segré, Clyde Wiegand y Thomas Ypsilantis. Sus escintiladores y contadores Cherenkov mostraban unos 60 candidatos a antiprotones, pero la prueba irrefutable de esta partícula, su aniquilación con un protón normal, no se confirmó inmediatamente. Eso llegó en 1956, cuando un grupo de físicos italianos, dirigidos por Amaldi, en cooperación con el grupo de Berkeley, informaron de la fijación de un antiprotón en una

pila de emulsión. El siguiente paso, usando antiprotones del Bevatrón para producir antineutrones, se llevó a cabo en 1957 por otro grupo de Berkeley. Ninguno de los descubrimientos supuso una gran sorpresa.

Había más en los primeros experimentos del Bevatrón que progreso científico. El éxito experimental, apoyado en el uso de un sistema de imanes tetrapolos sugerido primero por el físico de Brookhaven Oreste Piccioni, que pensaba que los físicos de Berkeley le habían robado su idea. En 1972, trece años después de que a Segré y Chamberlain les fuera concedido el premio Nobel por su descubrimiento, Piccioni tomó el paso bastante extremo de dar a conocer sus cargos en una demanda. Nada excepto el seguimiento de la prensa se dedujo de la inusual iniciativa. La demanda de Piccioni no fue la única consecuencia insólita de los experimentos. En 1979, J. C. Cooper acusó a Segré y a Chamberlain de haber suprimido deliberadamente datos que mostraban la evidencia de taquiones o partículas más veloces que la luz. «El experimento Segré es a la comunidad de la física lo que las cintas del Watergate fueron para el ex presidente Nixon», dijo de manera dramática (Franklin 1986, p. 239). Desgraciadamente para el drama, pero afortunadamente para la física, a la acusación le faltaban pruebas y pocos físicos la tomaron en serio.

Interacciones débiles

El neutrino evitó su detección cuatro años más que el antiprotón. Al contrario que esta última partícula, que apenas desempeñó papel alguno en la física teórica, el neutrino (o más bien el antineutrino) se hizo muy importante después de la teoría de Fermi de 1933 de la desintegración beta y fue usada rutinariamente por físicos nucleares en 1940. Los físicos creían en la existencia del neutrino independientemente de si la partícula había sido detectada o no. ¿Y qué significaba que una partícula existía? En un artículo de 1952, en el *Bulletin of the Atomic Scientists* titulado «¿Existe realmente el neutrino?» el físico teórico Sidney Dancoff mantenía desde una perspectiva positivista que era una cuestión insignificante y que conceptos como «neutrino» y electrón» eran simplemente maneras cómodas de organizar los datos experimentales. Lo único que le importaba a Dancoff era que el neutrino, hubiera sido detectado o no, era tan «real» como el electrón. Durante más de una década se asumió de manera generalizada que el neutrino siempre quedaría sin detectar por su interacción extremadamente débil con la materia. No existía un gran interés en intentar un experimento de detección, pero en Los Álamos, Frederick Reines y Clyde Cowan vieron en 1951 que las desintegraciones beta intensas derivadas de una explosión nuclear podrían proveer de suficientes (anti)neutrinos para su detección, a través de interacciones con los protones. Reines y Cowan pensaron seriamente utilizar una bomba atómica para su experimento, pero se decantaron por el más pacífico ambiente radiactivo de un reactor nuclear. Después de muchas dificultades, diseñaron un experimento en el cual el efecto de los neutrinos en el agua produciría una señal distintiva de coincidencias de rayos gamma. Para medir la señal, desarrollaron un sistema de detección compleja de 330 tubos mul-

tiplicadores inmersos en un líquido orgánico. En 1956, usando el reactor del río Savannah como fuente de neutrones, encontraron señales de que había indicios inequívocos de reacciones neutrino-protón. El descubrimiento del neutrino fue incluso menos sorprendente que el descubrimiento del antiprotón realizado el año previo.

Unos años después del experimento exitoso de Reines y Cowan, otros experimentos mostraron que las reacciones que ocurrían con el neutrino no ocurrían con el antineutrino, y que las dos partículas eran por tanto diferentes. Esto estaba de acuerdo con la conservación del número leptónico (L), una idea implícitamente introducida por Emil Konopinski y Hormoz Mahmoud en 1953. Tanto el electrón como el muón negativo tienen $L = +1$, así como los neutrinos asociados. Pero mientras la desintegración de un muón en un electrón y un par neutrino-antineutrino era bien conocida, la desintegración en un electrón y un cuanto gamma no se había observado; y, sin embargo, se permite según la conservación del número leptónico. De manera formal, esto se contabilizaba introduciendo incluso otra ley de conservación, por la cual el número muónico se conserva. Esto hizo que se sugiriera que el neutrino asociado con la desintegración $\pi\mu$ sería diferente del neutrino ordinario asociado con el electrón en la desintegración del neutrón. Si éste era el caso, $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$ estaría permitido, mientras que $\nu_{\mu} + n \rightarrow e^{-} + p$ estaría prohibido. La diferencia entre estas dos reacciones, y por tanto la existencia de un muón-neutrino separado del electrón-neutrino, fue mostrada experimentalmente en 1962 en una colaboración entre la Universidad de Columbia y el Laboratorio Nacional Brookhaven dirigida por Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger. El éxito del experimento se aseguró por el sistema de detección, una gigantesca cámara de chispa de diez toneladas de peso.

Con gran diferencia, el avance más sensacional en la física de interacciones débiles en los años cincuenta fue la prueba de que la paridad no se conserva en los procesos débiles. El principio de la invariancia de la paridad, o simetría izquierda-derecha, fue trasladado a la mecánica cuántica por Eugene Wigner en 1927-1928, e inmediatamente obtuvo un estatus paradigmático. Debe tenerse en cuenta que la paridad es en este contexto un concepto específicamente mecánico-cuántico. Cuando Hermann Weyl, en 1929, propuso una ecuación ondulatoria Dirac de dos componentes para partículas con masa cero y espín de un medio, Pauli rechazó la ecuación porque no satisfacía la invariancia de la paridad. La ecuación de Weyl no fue rehabilitada hasta mucho después, posteriormente al descubrimiento de la no conservación de la paridad. Hasta mediados de los años cincuenta, los físicos no se cuestionaban el dogma de la conservación de la paridad, y los pocos experimentos que, en retrospectiva, indicaban el incumplimiento de la ley de la conservación no fueron interpretados como tales.

Con el descubrimiento de las partículas extrañas, se hizo evidente que una de ellas, llamada θ^{+}, se desintegraba en dos piones ($\pi^{+}\,\pi^{o}$); la otra, la partícula τ^{+}, en tres piones ($\pi^{-}\,\pi^{+}\,\pi^{+}$). Además, las dos partículas tenían la misma masa y el mismo tiempo de vida, por lo que parecería que serían simplemente dos modos distintos de desintegrarse de la misma partícula. En cualquier caso, como demostraron Richard Dalitz y otros en 1954, el estado de espín y de paridad de θ era distinto del de τ, por tanto eran pre-

suntamente distintos. La enrevesada cuestión fue ampliamente debatida en 1955-1956 y se propusieron varias sugerencias para resolverlo. En 1956, Tsung Dao Lee y Chen Ning Yang, dos físicos chinos que llegaron a la Universidad de Chicago poco después de la guerra, sugirieron que la no conservación de la paridad era una posibilidad realista. Se encontraron para su sorpresa, con que la conservación de la paridad no estaba bien apoyada por los experimentos anteriores: «Se nos mostró como obvio que no había, en aquella época, una sola evidencia de la conservación de la paridad en la desintegración β, ¡y que debimos de ser muy estúpidos!» (Franklin 1986, p. 14). Habiendo «terminado de calcular y empezado a pensar» sugirieron al final de 1956 que la conservación de la paridad se incumplía en interacciones débiles, aunque avisaron de que «este argumento [...] no debe ser tomado demasiado en serio por la opacidad de nuestro conocimiento actual de las partículas extrañas». El pensamiento de Lee y de Yang les hizo sugerir dos tipos de experimentos, uno sobre la desintegración beta y otro sobre la desintegración $\pi\mu e$, que deberían ser capaces de revelar el sospechado incumplimiento de la conservación de la paridad. Los experimentos fueron realizados por tres grupos de físicos a principios de 1957: Chien-Shiung Wu en la Universidad de Columbia investigó la desintegración beta, la desintegración mesón fue examinada por Richard Garwin, Leon Lederman y Marcel Weinrich, también en la Universidad de Columbia, y usando una técnica distinta, Jerome Friedman y Valentine Telegdi en la Universidad de Chicago. Los resultados probaron que Lee y Yang tenían razón: la paridad no se conserva en las interacciones débiles. La ruptura de la ley de la conservación de la paridad fue, a pesar de su naturaleza revolucionaria, aceptada rápidamente por la comunidad física. Pauli, gran seguidor de los principios de simetría y que, ya en enero de 1957, había escrito a Victor Weisskopf que «no creo que el Señor sea un débil zurdo» no fue una excepción. En otra carta a Weisskopf, describió su propia reacción: «Ahora, después de haber superado el primer impacto, empiezo a recoger mis pedazos. Sí, fue muy dramático [...] estoy impactado, no tanto por el hecho de que el Señor prefiera la mano izquierda, sino por el hecho de que Él todavía parece ser simétrico izquierda-derecha cuando él se expresa a Sí mismo de manera fuerte» (Franklin 1986, p. 25).

El descubrimiento de la no conservación de la paridad contribuyó a un cambio general en el clima intelectual de la física fundamental, dirigida a una tendencia a cuestionarse la validez absoluta de otras leyes de conservación también. Como expresó Philip Morrison en 1958, «no podemos escapar a mirar todas las simetrías tan abiertas como ahora a una duda razonable, y como candidatas a una prueba experimental» (Kragh 1997c, p. 204). Incluso los principios de conservación de energía y conservación de la carga se podrían cuestionar, como lo fueron en conexión con algunos de los modelos cosmológicos debatidos en ese tiempo. La explicación de Lee-Yang mostró no sólo que la paridad (P) se incumplía en interacciones débiles, sino que también era el caso con la conjugación (C) de la carga, esto es, la simetría partícula-antipartícula. Esta propiedad invariante nos retrotrae a la introducción de las antipartículas de Dirac en 1931, fue formulado como un teorema por Wendel Furry el año siguiente y declarado como principio de invariancia general por Kramers en 1937. Landau, aunque acepta-

ba el resultado de Wu y otros, estaba entre aquellos que no estaban contentos con la no conservación de la paridad porque parecía que estaba en conflicto con la isotropía del espacio. «En mi opinión una simple negación de la conservación de la paridad pondría a la física teórica en una situación incómoda», escribió Landau en 1957. Por esa razón sugirió que «todavía tenemos invariancia con respecto al producto de las dos operaciones [*CP*], a la cual llamamos inversión combinada [...] [y la cual] consiste en reflejo del espacio con intercambio de partículas y antipartículas» (Franklin 1986, p. 79).

Como mostraron Pais y Piccioni en 1955, la teoría de mezcla de partículas de los kaones propuesta por Gell-Mann y Pais predecía que un haz de las partículas de larga vida K^0_2 después de su paso por la materia «regeneraría» las partículas K^0_1 de corta vida que habían sido en origen mezcladas con las partículas K^0_2. Este fenómeno fue confirmado en 1961 y unos pocos años más tarde los físicos de Princeton James Cronin, Jim Christenson y Val Fitch, en colaboración con el francés René Turlay, se unieron para investigar con mayor profundidad. Al mismo tiempo, estudiaron la desintegración de K^0_2 en dos piones, un proceso que no estaría permitido según la conservación de *CP*. Los resultados del elaborado experimento, llevado a cabo en el nuevo sincrotrón de gradiente alternante de Brookhaven, fueron publicados en 1964. Mostraban 45 desintegraciones de dos piones de entre casi 30.000 desintegraciones analizadas. Como apuntaba el grupo de Princeton, esto probó que en esta desintegración, en concreto, incluso la conservación *CP* era incumplida. Este resultado importante, más tarde reconocido con un premio Nobel, sólo fue mencionado brevemente en el artículo de los físicos de Princeton. «La presencia de una desintegración de dos piones implica que el mesón K^0_2 no es un puro eigen-estado de *CP*», escribieron. Eso era todo, pero era suficiente.

El que quizá sea el más fuerte de todos los principios de invariancia, el teorema *CPT*, mantiene que todos los procesos son invariantes bajo las operaciones combinadas de *C*, *P*, y la inversión del tiempo (*T*). Esto fue formulado en distintas versiones en los años cincuenta, pero no se puede adscribir a un único físico o darle un año concreto de nacimiento. Se le suele acreditar la paternidad a Pauli, Gerhard Lüders o a Julian Schwinger, pero John Bell y Bruno Zumino deberían también considerarse candidatos. Ya fundado sólidamente en los conceptos más elementales de relatividad y de mecánica cuántica, el teorema *CPT* goza de un estatus en la física muy alto, casi sagrado. Con la prueba de la infracción de la desintegración de K^0_2, se hizo notorio que o bien el teorema *CPT* no podía apropiarse de una validez absoluta o la inversión del tiempo falla. A pesar de este dilema, que se dirigía a una elección entre dos consecuencias igual de poco atractivas, la mayoría de los físicos aceptó los resultados de Princeton como prueba de la infracción de *CP*. Se sugirieron explicaciones alternativas, pero ninguna consiguió una aceptación amplia. El menor de los dos males, según le parecía a la mayoría de los físicos, era aceptar que la simetría del inverso del tiempo se rompe en la desintegración de los dos piones de K^0_2. Aunque los físicos han buscado evidencias directas de la infracción de *T* desde mediados de los años sesenta, no se ha encontrado una confirmación definitiva.

La significación de los experimentos de la violación de la paridad de 1957 y la violación de *CP* en 1964 no estaba restringida a las implicaciones cognitivas; éstos fueron decisivos para la formación de la subdisciplina conocida como física de interacciones débiles, un campo que ya se encuentra en la teoría de Fermi, en 1933-1934, pero que sólo tuvo un significado social en 1957. Los datos bibliométricos mostraban claramente la importancia de los dos eventos en el auge de la teoría de interacción débil. Como porcentaje del número total de publicaciones de física, las publicaciones sobre interacciones débiles florecieron desde el 1 al 3 por 100 en 1958, y después cayeron a su cantidad «normal» del 1 por 100 en dos años. Durante los años 1950-1970, el porcentaje de artículos de física de interacción débil que eran predominantemente teóricos con respecto a los que eran predominantemente experimentales, floreció de un aproximado 0,8 a un 5,8 por 100 (Vlachy 1982, p. 1066). Los incrementos súbitos del porcentaje alrededor de 1958 y 1965 reflejan el impacto de los dos descubrimientos pioneros sobre el incumplimiento de la simetría.

Los quarks

De acuerdo con el folklore de la física, se le atribuye a Fermi haber contestado una pregunta relativa a los nombres de las partículas elementales con «joven, si fuera capaz de recordar los nombres de estas partículas, me hubiera hecho botánico». Eso fue en 1954, en un tiempo en el que se conocía una docena de partículas. Diez años después una reseña subrayaba que «hace sólo cinco años, se podía hacer una lista ordenada de 30 partículas subatómicas, [...] desde entonces, se han descubierto entre 60 y 70 objetos subatómicos más» (Pickering 1984a, p. 50). En efecto, durante esos años el número de mesones y bariones [...] fuertemente desintegrables explotó como resultado de las innovaciones en la tecnología de aceleradores y detectores. Con el incremento de partículas aumentó la necesidad de entenderlas o, al menos, de clasificarlas de acuerdo con algún marco teórico. Las ideas para organizar las partículas elementales, en el sentido de reducirlas a menos objetos, venían del final de los años cuarenta y estaban basadas en el formalismo del isospín. En 1949 Fermi y Yang especularon que el pión podría ser concebido como una combinación de un nucleón y un antinucleón, y en 1956 el físico japonés Shoichi Sakata sugirió una teoría de acuerdo con la cual los dos nucleones y la partícula Λ –a veces conocidos como «sakatones»– eran los pilares de construcción de los mesones pesados y de los hiperones. El interés de Sakata y de otros científicos en la Universidad de Nagoya por la composición de las partículas elementales estaba guiado por la metodología marxista del materialismo dialéctico. Aunque el modelo de Sakata parecía prometedor, y fue útil para poder entender los estados mesónicos, a finales de los años sesenta no atraía ya mucha atención fuera de Japón.

El más exitoso de los primeros sistemas de clasificaciones estaba basado (como el de Sakata) en el grupo de simetría SU(3), originalmente como parte de una teoría de campo de gauge de interacciones fuertes. La propuesta del grupo SU(3) fue realizada en 1961, de manera independiente por Gell-Mann, entonces en Caltech, y Yuval Ne'e-

man, un joven teórico israelí que en la época estaba trabajando como agregado militar en Londres. La idea se vino a conocer como «Eightfold Way» (vía óctuple»), término acuñado por Gell-Mann. De acuerdo con esta vía o sistema de clasificación, las partículas estaban agrupadas o «representadas» en múltiplos, caracterizados por un espín y números de paridad definidos e incluyendo partículas con isospines y extrañeza distintos. Por ejemplo, las partículas con un espín de un medio y paridad positiva formaban un octeto que consistía en p, n, Λ, Σ^+, Σ^-, Σ^o Ξ^- y Ξ^+, siendo caracterizadas cada una de las ocho partículas por su isospín y por su extrañeza. El octeto era la entidad básica de la teoría Gell-Mann-Ne'eman, que también incluía decupletos y, para los mesones, nonetos. En la época en que se propuso la vía óctuple existían varios «agujeros» en los modelos en forma de partículas desconocidas, y existía incertidumbre con relación al lugar adecuado de algunas de las partículas recientemente detectadas. En el octeto constituido por piones y kaones, faltaba una partícula. Cuando se encontró la resonancia η en otoño de 1961 y resultó acoplarse de una manera fácil en el esquema, esto le dio un apoyo valioso a la vía óctuple. La teoría fue debatida en la conferencia de Rochester de 1962 y también en una conferencia en el CERN el mismo año. En ambas conferencias, el múltiplo de barión de espín 3/2 y de paridad positiva estaba entre los temas a tratar. Este múltiplo contenía nueve partículas, algunas de las cuales, la Σ^* y la Ξ^*, fueron dadas a conocer por primera vez en la conferencia del CERN. Si era un decupleto, debería contener una partícula adicional –y aún desconocida–. Gell-Mann e independientemente Ne'eman argumentaron que el décimo miembro debería tener una extrañeza de –3 y una masa de unos 1680 MeV; además, debería ser una partícula ordinaria con un tiempo de vida relativamente largo, más que una resonancia. Gell-Mann nombró la partícula predicha como hiperón Ω^- y dejó el escenario abierto para los físicos experimentales. (La unidad de masa MeV, abreviatura de MeV/c^2, equivale a aproximadamente la masa de dos electrones.)

Los físicos en Europa y en Estados Unidos estaban deseosos por igual de encontrar, o más bien desarrollar y después encontrar, la partícula predicha. La búsqueda derivó pronto en una competición entre el CERN en Europa y el laboratorio Brookhaven en Estados Unidos, con los estadounidenses como ganadores de la carrera. A principios de 1964, un grupo de treinta y tres físicos de Brookhaven, dirigidos por Nicholas Samios, pudo anunciar un experimento de total éxito. Encontraron en su cámara de burbujas de hidrógeno expuesta a kaones una traza que, concluyeron, era el resultado de la desintegración de Ω^- producida como $K^- p \rightarrow \Omega^- K^+ K^o$. No sólo tenía la partícula la extrañeza (–3) y tiempo de vida ($0{,}7 \times 10^{-10}$) adecuados, también encontraron que la masa era de 1.686 ± 12 MeV, excelentemente acorde con el valor predicho. La confirmación, por supuesto, fue un gran triunfo para SU(3) y para el esquema de clasificación de la vía óctuple, con una contundencia que ya no podía ser puesta en duda. Con el éxito del esquema, los físicos naturalmente se preguntaban por qué funcionaba tan bien, una cuestión que había sido considerada por Gell-Mann y otros incluso antes del éxito de Ω^-. Existía otra dimensión en el experimento, tan característica de la física de partículas moderna como la pura dimensión científica. Antes de que el equipo

de Brookhaven entregara su artículo a la *Physical Review Letters*, de publicación rápida, dieron una conferencia de prensa, con la instrucción de que los periódicos sólo publicarían la noticia una vez que hubiera aparecido el artículo. De algún modo hubo una filtración, y aparecieron noticias sobre el descubrimiento en la *New Scientist* antes de la fecha de publicación. Uno de los físicos de Brookhaven dijo: «Fue un desastre. Arruinó nuestra publicidad. Hubiéramos obtenido la primera página del *New York Times* del domingo, que es algo muy bueno de obtener. Después de todo, ¿de dónde conseguimos el dinero nacional? Del Congreso. Supone una gran diferencia conseguir la portada en el *New York Times*, ya que casi todos los congresistas la leen. Es un factor, y no podemos negarlo, por lo que nos importa muchísimo» (Gaston 1973, p. 86).

En 1964 la interpretación de la Eightfold Way en términos de un modelo compuesto de hadrones (partículas de interacción fuerte) fue propuesta por Gell-Mann, quien, inspirado en un pasaje de *Finnegans Wake*, de James Joyce, llamó a las partículas constituyentes «quarks». Una sugerencia muy similar, pero usando el término «ases» (en inglés, «aces») en vez de «quarks», fue realizada de manera independiente por Georg Zweig, un americano, ruso de nacimiento, de veintiséis años, y alumno de Gell-Mann que trabajaba en el CERN; los físicos adoptaron el nombre más literario. Según a la idea del quark, todos los hadrones consistían en combinaciones de dos o tres quarks y sus antiquarks, lo que significaba que los cientos de partículas hadrónicas y resonancias se reducían a combinaciones de tres entidades fundamentales. Éstos eran los quark «up» (también conocidos como quark «arriba») y los quark «down» (también conocidos como quark «abajo»), ambos con extrañeza cero, pero con isospín opuesto, y el quark «extraño» con $S = 1$. Por ejemplo, el protón estaba compuesto por uud, y el pión negativo por $d\bar{u}$. El hecho más destacable en la concepción del quark era que los nuevos objetos hipotéticos tenían cargas eléctricas fraccionales, en concreto, +2/3 para el quark u y −1/3 para los quarks d y s. ¿Eran los quarks, más que una anotación de contable, una regla memotécnica útil? ¿Existían como objetos dinámicos que podían ser detectados? Estas cuestiones fueron planteadas inmediatamente por físicos que reconocían el éxito de clasificación del modelo del quark simple, pero que tenían reservas respecto al estatus ontológico de los quarks. Gell-Mann, el inventor del quark, enfatizó que su invención no existía. «Es divertido especular cómo se comportarían los quarks si fueran partículas físicas de masa finita», escribió en su artículo de 1964. «Una búsqueda de quarks estables de carga −1/3 ó −2/3 y/o diquarks estables de carga −2/3 ó +1/3 ó +4/3 en los aceleradores de mayor energía nos ayudaría a reafirmarnos en la no existencia de los quarks reales» (Pickering 1984a, p. 88). Gell-Mann afirmó después que había empleado la palabra «real» como opuesta a «matemática», no para negar que los quarks existiesen, sino para evitar discusiones filosóficas relativas al significado de la existencia de objetos permanentemente confinados.

El modelo del quark no fue especialmente bien recibido en sus primeros años. Una de las razones fue el fracaso persistente de los experimentalistas en la detección de quarks libres; otro, que el modelo quark se veía en general como teóricamente infun-

dado y en desacuerdo con otras alternativas más populares en la época. Los quarks funcionaban perfectamente en el nivel fenomenológico, pero para muchos físicos eran meras expresiones simplistas de las dinámicas de un mundo hadrónico que todavía no se entendía. La menos que entusiasta respuesta no evitó que los experimentalistas intentaran refutar a Gell-Mann, esto es, mostrar que los quarks existían, más que mostrar que no existían. Un estudio de 1977 de experimentos de búsqueda de quarks listó unas ocho búsquedas de este tipo. Entre las muchas búsquedas que seguían la teoría de 1964, la más interesante fue llevada a cabo por William Fairbank y sus colaboradores en la Universidad de Stanford. En 1977, después de varios años de trabajo, el grupo de Stanford comunicó que había encontrado cargas fraccionales en experimentos tipo Millikan, en concreto, tres casos de bolas diminutas de niobio que poseían un tercio de la carga del electrón. El hallazgo fue controvertido, tanto experimental como teóricamente, ya que en esa época los teóricos se habían convencido de que los quarks libres no existían, sino que estaban permanentemente confinados dentro de los hadrones, de los cuales formaban parte. Baste decir que el hallazgo no fue confirmado por otros experimentos y que fue, después de mucho debate, rechazado por la comunidad física de partículas elementales.

El quark no fue la única partícula elemental que escapó a la detección. Muchas otras partículas exóticas habían sido predichas sin haber sido nunca encontradas, bien por ser demasiado difíciles de encontrar, bien porque no existían: el monopolo magnético es un ejemplo. Dirac demostró en 1931 que los polos magnéticos aislados eran posibles, esto es, consistentes con las leyes básicas de la física. Durante más de tres décadas, la posibilidad fue ignorada, pero, en los años setenta, los monopolos se convirtieron en objetos interesantes, después de que Gerardus 't Hooft en los Países Bajos y Alexander Polyakov en la Unión Soviética mostraran que ciertas teorías de campo de gauge predecían monopolos magnéticos enormes. En 1975, Paul Buford Price y sus colegas anunciaron que habían encontrado en la radiación cósmica un monopolo con la fuerza predicha. El descubrimiento, anunciado en una conferencia de prensa, causó sensación. Price mencionó (quizá de manera irónica) que «se pueden impulsar barcos por los mares poniendo unos cuantos monopolos en el barco y haciendo que el campo magnético de la Tierra tire a lo largo del océano»; y esto no era todo, de acuerdo con el Instituto Americano de Física, el descubrimiento podría derivar en aplicaciones tan útiles como «nuevas terapias médicas en la lucha contra enfermedades como el cáncer y nuevas fuentes de energía». Al ser confrontado con semejante declaración, el portavoz del AIP (American Institute of Physics) dijo que «la gente espera que seas capaz de decir qué uso puede tener un experimento y él [el portavoz] simplemente está haciéndolo lo mejor que puede» (Kragh 1981b, p. 160). Ni se obtuvo energía magnética ni una cura contra el cáncer. Un año después, se decidió por consenso que el anuncio del descubrimiento había sido erróneo.

El fracaso de Price no paró a los cazadores de monopolos, que continuaban buscando la escurridiza partícula. En 1982 se hizo otro anuncio de un sensacional descubrimiento, esta vez por Blas Cabrera en la Universidad de Stanford. Grabó el cambio

en el flujo magnético de un anillo superconductor y lo interpretó como el resultado de un monopolo pasando por el anillo. Aunque el suceso no estaba explicado en términos de otras fuentes, ni estaba por otra parte probado como un error, ni Cabrera ni otros lograron confirmarlo. Un suceso solo no fue suficiente para cambiar el estatus del monopolo: de famosa partícula por encontrar a partícula real.

El crecimiento de la física de partículas

Desde un punto social y cuantitativo, el primer cuarto de siglo de la física de altas energías se caracterizó por dos hechos: un fuerte crecimiento y un fuerte dominio estadounidense –no una «americanización», usar ese término implicaría que los Estados Unidos se hubieran apropiado de un campo ya establecido, y éste no era el caso–; la física de altas energías era en gran medida una invención estadounidense. (En esta sección, de acuerdo con la convención, nos referiremos a la física de altas energías como HEP (siglas del inglés *High Energy Physics*). No hay datos contundentes sobre la distribución internacional de la HEP en el periodo entre 1950 y 1970, pero en el estudio del Instituto Americano de Física se indica que, a mediados de los sesenta, el 32,3 por 100 de los físicos teóricos de altas energías eran estadounidenses o canadienses, el 35 por 100 era de la Europa no comunista, y la mayor parte del resto era de la Unión Soviética y sus aliados en la Europa del Este. La contribución de los físicos japoneses fue significante, y la de los países del Tercer Mundo apenas destacable. El dominio americano está fuera de discusión, lo que, dada la situación antes de la guerra y el curso de los eventos durante y poco después de la guerra, no es muy sorprendente. Aunque hay otros dos factores importantes: Estados Unidos invirtió en HEP, pero no mucho más que algunos países europeos. Por ejemplo, en 1967-1968, los Estados Unidos gastaron unos 160 millones de dólares en HEP, sin duda una gran suma; eso fue unas cuatro veces lo gastado en Gran Bretaña, pero teniendo en cuenta las diferencias de población y renta per cápita, el resultado final es que Gran Bretaña invirtió más recursos en HEP que los Estados Unidos. La otra cuestión para recordar es que la mayoría de los físicos que trabajaban en Estados Unidos y, por tanto, contribuían a la parte de la física de ese país, eran europeos o asiáticos. Al 30,4 por 100 de los ciudadanos estadounidenses que contribuyeron a ese 32,3 por 100 de norteamericanos indicado antes, debe añadirse un aproximado 12 por 100 que no eran estadounidenses pero que trabajaban en los Estados Unidos. Durante las primeras décadas del periodo de posguerra (y todavía hoy, en menor medida), los Estados Unidos actuaron como un imán en muchos campos de la física y contribuyeron a una internacionalización –algunos lo llamarían una americanización– de la física. Sin embargo, la dominación americana nunca fue total, ni cuantitativa ni cualitativamente. El ranking de países de 1981, medidos en relación con la proporción del total de publicaciones totales mundiales en HEP, estaba encabezado por los Estados Unidos como claro número uno, con casi el 30 por 100. Le seguían, por este orden, la Unión Soviética, Alemania, Japón, Reino Unido, Francia e Italia, todos con un 4 por 100 o más. En la «se-

TABLA 21.2
Distribución regional de publicaciones de física de altas energías, 1982

Nº de posición	*País o región*	*Porcentaje de publicaciones*
1	Europa occidental	34
2	Norteamérica	31
3	Unión Soviética	14
4	Japón	6
5	Europa del Este	5
6	India	3
—	Otros	7

Nota: En este año, el número total de publicaciones en el campo fue de alrededor de 4.000. Datos de Vlachy 1982.

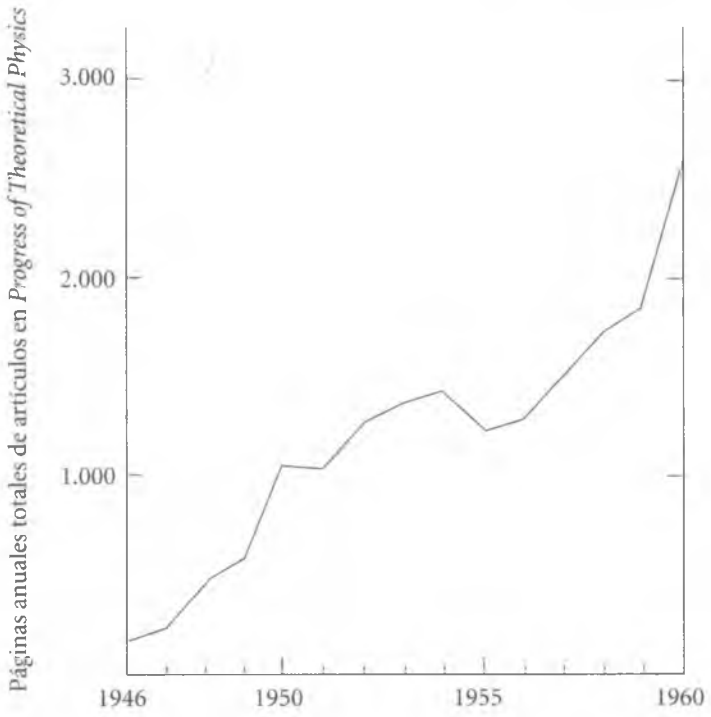


Gráfico 21.1. La expansión de *Progress of Theoretical Physics* 1946-1960, indicada por el número total de páginas anuales. *Fuente:* Reproducido de Konuma 1989, con permiso de Cambridge University Press.

gunda división», contribuyendo entre un 1 y un 4 por 100, venían la India, China, Canadá, Polonia, España e Israel (véase tabla 21.2). Un recuento del mismo año, 1981, muestra que si se mide por número de artículos de física de partículas por millón de

habitantes, Israel es el claro número uno, seguido por Suiza, Alemania, Dinamarca y Estados Unidos.

Siendo de interés dichas cifras, no deberían tomarse demasiado en serio. Como casi todo el resto de ramas de la física, la HEP es internacional y lo que cuenta de verdad no es tanto el origen nacional como las instituciones en las que se ha llevado a cabo la investigación. A este respecto, como comentábamos en el capítulo 20, el CERN y otros laboratorios europeos tomaron la iniciativa desde aproximadamente 1980. El relevo estaba basado en porcentajes de crecimiento diferentes en la producción de los físicos de altas energías. En 1962 la comunidad europea de HEP estaba formada por 685 científicos y la comunidad americana por 798. Llegando a 1975, Europa había sobrepasado a los Estados Unidos en cuanto a mano de obra. En ese año, la población estadounidense de físicos doctorados en HEP se incrementó a 1.732, mientras que Europa pudo subir hasta 1.806 doctores en física de HEP.

A pesar del internacionalismo, naturalmente había tendencias particulares de cada espacio nacional y cultural. Por ejemplo en Japón, la física de partículas y la teoría cuántica de campos disfrutaban de una posición fuerte antes de la guerra, una posición que de manera primordial se debe a los trabajos de Nishina y Yukawa. En periodo de guerra, Yukawa, Tomonaga, Sakata y otros continuaron su trabajo bajo condiciones cada vez más difíciles. Con la ocupación de los Estados Unidos, se generó una queja de

TABLA 21.3
Distribución de publicaciones de campos científicos según *Physics Abstracts*, 1964 y 1968

	1964		*1968*		*Crecimiento anual (porcentaje)*
Campo de estudio	*Número*	*Porcentaje*	*Número*	*Porcentaje*	
Física del estado sólido	9.024	31,5	16.992	33,7	22
Física nuclear y física de altas energías	5.486	19,1	8.242	16,3	13
Electricidad y magnetismo (incluye física del plasma)	3.781	13,2	4.572	9,1	5
Atómica y molecular	2.156	7,5	4.327	8,6	24
Fluidos	1.487	5,2	3.612	7,1	36
Astrofísica	1.124	3,9	2.288	4,5	25
Geofísica	1.110	3,9	2.596	5,1	35
Óptica	798	2,8	1.407	2,8	19
Biofísica	206	0,7	83	0,16	–15
Total	28.656		50.477		19

Nota: No están incluidos todos los campos. Basado en Anthony, East y Slater 1969, p. 723.

que «toda la investigación en Japón, sea de naturaleza fundamental o aplicada, en el campo de la energía atómica, debería ser prohibida» (Konuma 1989, p. 536). A pesar de muchos problemas, los teóricos de HEP florecieron en Japón de un modo destacable. El crecimiento está ilustrado por la revista científica internacional japonesa *Progress of Theoretical Physics (Progreso de la física teórica)*, fundada por Yukawa en 1946 y que se convirtió en una revista científica líder de HEP (véase gráfico 21.1).

La impresión general es la de que la HEP «explotó» en los dos primeros decenios después de 1945, y no es una impresión sin fundamento. No hay cifras fidedignas de antes de 1964, pero entre 1964 y 1968 –en muchos aspectos, los años de explosión de la HEP– las publicaciones bajo la categoría de «física nuclear y de altas energías» subieron de 5.486 artículos a 8.242. Tras un primer vistazo, puede parecer un incremento espectacular, pero de hecho ni siquiera igualó el incremento medio en la física: el porcentaje de artículos científicos sobre HEP entre todos los artículos de física cayó del 19,1 al 16,3 (tabla 21.3). La razón principal es que lo que hasta entonces se consideraba como la hermano mayor de la HEP, la física nuclear, se hizo menos popular, no que el interés en HEP declinara. Bastante al contrario, durante este periodo de cuatro años, la HEP experimentó un *boom* extraordinario, desde los 1.529 a los 4.776 artículos, una razón de crecimiento de un 212 por 100, sin precedentes. La tabla 21.3 lista el crecimiento en distintos campos durante 1964-1968, y la tabla 21.4 el crecimiento en algunas especialidades en el mismo periodo. Éste es el periodo en el que la HEP y la física del estado sólido predominaban y en el que la corriente principal de la década anterior, la física nuclear, perdió su posición privilegiada. Desde mediados de los años treinta hasta mediados de los cincuenta, la física nuclear fue la rama de moda por excelencia de la física, con la HEP simplemente siguiendo sus pasos. En 1939, el 33 por 100 de todos los artículos en *Physical Review* estaban en la categoría «física nuclear» y el 10 por 100 en «física de altas energías». En 1949, las proporciones eran del 51 por 100 y 12 por

TABLA 21.4
Crecimiento en subdisciplinas seleccionadas, 1964-1968

Campo	*Número*		*Crecimiento anual (porcentaje)*
	1964	*1968*	
Física de altas energías	1.529	4.776	53
Propiedades magnéticas de los sólidos	910	2.563	46
Propiedades eléctricas de los sólidos	1.232	2.808	32
Propiedades ópticas de los sólidos	985	2.009	26
Física molecular	1.437	2.329	16
Defectos de los sólidos	858	1.229	11
Física del plasma	962	1.373	11
Reacciones nucleares	1.043	1.301	6

Nota: Basado en Anthony, East y Slater 1969, p. 724

100 respectivamente, pero durante la siguiente década la proporción de HEP subió rápidamente y la de la física nuclear decreció de manera correspondiente.

Hay más en este modelo que sólo una explosión: hay que considerar primero las subvenciones de la física de altas energías de los Estados Unidos, principalmente del Departamento de Energía y de la National Science Foundation (tabla 21.2). En el decenio de 1955 hasta 1965 se dio un crecimiento ininterrumpido, llegando a un pico alrededor de 1970, cuando el campo recibió casi 800 millones de dólares anuales (en precios de 1984), pero a partir de entonces, la HEP experimentó una caída en su apoyo económico, si bien no fue drástica; de todos modos, hubo periodos en los cuales la comunidad de HEP tuvo razones para preocuparse (véase también el capítulo 26). En 1975, la HEP estadounidense recibió sólo la mitad de dinero del que recibió cinco años antes. Durante este breve periodo de crisis, incluso los pagos en dólares constantes disminuyeron. Desde aproximadamente 1970, hubo un incremento real del interés en la HEP americana, reflejado por ejemplo en el número total de doctorados realizados en el campo. La HEP se había acostumbrado a su crecimiento y en 1971, el número de doctorados en HEP llegó a un pico con unos 280 graduados que se doctoraron en HEP. Después la cifra disminuyó velozmente a 130 en 1975 y se mantuvo en este nivel durante los siguientes quince años. La tendencia correspondía a una disminución del 19 por 100 de todos los doctorados físicos en 1963 (el año récord) al aproximado 12 por

Gráfico 21.2. Financiación en los EEUU de la física de altas energías por año y el número de miembros de la American Physical Society. *Fuente:* Reproducido de Yang 1989, con permiso de Cambridge University Press.

100 en el periodo siguiente posterior al mal año de 1975. Una cosa es el dinero que llega, otra los estudiantes de doctorado; ¿y qué decir de las publicaciones, generalmente consideradas como una medida objetiva de la salud de una disciplina científica? El número de publicaciones de HEP subió de manera sostenida e impresionante desde 1960 a 1990, pero el incremento es de algún modo una ilusión: al medirse en proporción al total de las publicaciones de física, el número disminuyó de casi un 14 por 100 en 1960 a un 6 por 100 en los años posteriores a 1975 (gráfico 21.3). Éstas sólo son cifras de la HEP americana. En el ámbito mundial, la proporción de artículos de HEP de todos los

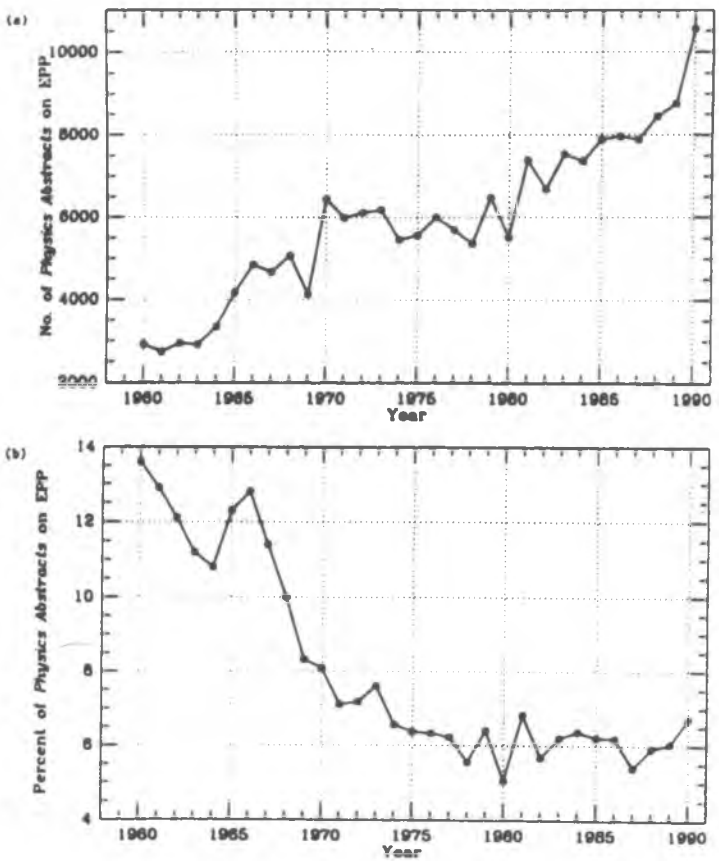


Gráfico 21.3. El gráfico superior muestra las publicaciones anuales sobre física de altas energías, como indica el número de entradas en las secciones de *Physics Abstracts* dedicadas a las partículas elementales, teoría de campo cuántica, rayos cósmicos y aceleradores y detectores de partículas e instrumental relacionado. En la figura inferior, los mismos datos están mostrados como porcentaje de todas las entradas en *Physics Abstracts*. *Fuente:* Reimpreso con permiso de R. Corby Hovis y Helge Kragh, «Resource letter HEPP-1: history of elementary-particle physics» *AJP* 59 (1991), pp. 779-807. (©) American Association of Physics Teachers.

artículos de física era alrededor del 4 por 100 en 1981, con los Estados Unidos ligeramente por debajo de la media de algunos países más pequeños, como España, Italia, Israel y Pakistán, muy por encima de la media. Hay, por supuesto, una aportación del Tercer Mundo en HEP, como la hay en la ciencia en general. En muy resumidas cuentas, los países en vías de desarrollo apenas han sido visibles en la HEP, y cuando lo han sido, sus físicos a menudo han trabajado y vivido en Europa o en Norteamérica. Por ejemplo, mientras que alrededor de 1965, el 6 por 100 de los físicos de altas energías eran indios, sólo el 2,4 por 100 estaban empleados en India.

¿Dónde publicaban los físicos de altas energías sus artículos? Resulta, de manera no inesperada, que había una jerarquía bastante definida, con algunas publicaciones percibidas como más prestigiosas (o deseables) que otras. El ranking de las publicaciones de HEP relevantes en los años sesenta era éste: *Physical Review Letters; Physical Review* (ambos de la American Physical Society); *Physics Letters* (europea, establecida en Países Bajos) y *Nuovo Cimento* (Sociedad Italiana de Física).

La HEP experimental rápidamente evolucionó hacia el modelo colaborativo de la ciencia, caracterizado por muchas colaboraciones entre muchos científicos, y ya no el trabajo de físicos individuales del tipo Rutherford o Curie. Esto fue, por supuesto, el resultado de la dependencia creciente de las instalaciones de gran ciencia, como aceleradores y detectores de cámara de burbujas. Hacia el final de los sesenta, no era raro que un equipo de veinte o treinta físicos apareciera como autor de un artículo, y esto sólo era el principio. También hay que destacar la relación cambiante entre experimentación y teoría en la HEP. El número de teóricos creció mucho más deprisa que el número de experimentadores, y los dos grupos cada vez se separaban más. En 1968, 316 de entre 682 estudiantes de posgrado en HEP estadounidenses eran teóricos. Sólo en casos muy determinados, los jóvenes teóricos migraban a la cultura experimental o viceversa. De entre los jóvenes científicos que publicaron dos ó más artículos en física de interacciones débiles alrededor de 1970, la aproximación del 94 por 100 de ellos en su segundo artículo era el mismo que el de su primer artículo (esto es, experimental o teórica).

CAPÍTULO 22

Teorías fundamentales

QED

Como se mencionaba en el capítulo 13, la teoría cuántica de interacciones electromagnéticas –electrodinámicas cuánticas o QED (de *Quantum Electrodynamics*)– fue objeto de mucho debate en los años treinta. En esa época, muchos físicos pensaron que no sería posible desarrollar la teoría convencional en un modelo que fuera a la vez teóricamente satisfactorio y empíricamente fructífero. Mientras que las cantidades infinitas que resultaban en las aplicaciones de la teoría no pudieran ser evitadas, había poca esperanza de un progreso fundamental. Los problemas no recibieron mucha atención durante la guerra, cuando la mayoría de los físicos estaban ocupados con otras materias, pero después de 1945 era el momento oportuno de enfrentarse nuevamente a los infinitos. Aunque el gran avance no estaba causado directamente por nuevos resultados empíricos, la teoría y la experimentación fueron de la mano en los importantes avances de 1947-1948 que dieron lugar a una nueva teoría de QED.

La teoría de 1928 del átomo de hidrógeno de Dirac reprodujo la fórmula de la estructura fina confirmada por experimentos de Sommerfeld y se le dio crédito, en general, por encima de las críticas que pudo recibir. La teoría ignoraba los efectos asociados con la interacción del electrón con su propio campo, no obstante, experimentos en los años treinta indicaban que la estructura de línea de hidrógeno H_α no encajaba exactamente en las predicciones. Había varias conjeturas sobre esa discrepancia que, de ser real, estaría causada por desviaciones de la ley de Coulomb. En 1938, el teórico de Caltech Simon Pasternack sugirió lo que diez años más adelante se vino a conocer como el desplazamiento de Lamb, si bien en esa época la situación experimental no estaba clara y la idea de Pasternack se mantuvo sin desarrollar. Hubo que esperar hasta después de la guerra, cuando se dio la prueba experimental definitiva del cambio espectral. Usando una técnica de microondas sofisticada con la que se había familiarizado durante el tiempo de guerra, Willis Lamb, en el Laboratorio de Radiación de Columbia,

explicó la cuestión. Junto a su estudiante Robert Retherford, demostró en la primavera de 1947 que los dos estados del hidrógeno $2S_{1/2}$ y $2P_{1/2}$, que según la teoría de Dirac tendrían la misma energía, estaban separados por una pequeña energía correspondiente a la onda número 0,033 cm^{-1}.

La significación del desplazamiento de Lamb fue reconocida inmediatamente por los participantes de la conferencia en Shelter Island sobre «Los fundamentos de la mecánica cuántica», cerca de Nueva York a principios de junio de 1947. Entre los participantes de esta importante conferencia estaban Bethe, Weisskopf, Kramers, Pais, Schwinger, Feynman y también Lamb, que dio a conocer sus resultados. La importancia teórica del desplazamiento de Lamb era que podía ser debido a una interacción del electrón con el campo de radiación y que podría, por tanto, servir como una guía para una teoría mejorada de QED. Que el desplazamiento de Lamb era sin duda un efecto QED fue mostrado primero por Bethe, inmediatamente después de la conferencia. Bethe demostró en un cálculo provisional que la mayor parte del desplazamiento de Lamb se podía explicar de este modo; su cálculo estaba basado en una forma simple de la teoría de la renormalización de la masa, una idea que ya había sido propuesta antes de la guerra, por Kramers en concreto. El cálculo de Bethe no era del todo relativista, y el siguiente paso era extenderlo y refinarlo haciendo uso de una aproximación relativamente invariante. Tales cálculos fueron realizados por varios físicos entre 1947 y 1949, incluyendo a Lamb y Norman Kroll, Weisskopf y Bruce French, Schwinger, Feynman y Tomonaga y su grupo en Japón. El resultado fue una concordancia absoluta con los experimentos y una confirmación de la técnica de la renormalización.

Las contribuciones seminales de Julian Schwinger a la nueva QED fueron asociadas con otro experimento delicado, la medición del momento magnético anómalo del electrón. En 1947, un grupo de físicos de la Universidad de Columbia demostró que el valor del momento magnético era un poco mayor que el predicho en la teoría de Dirac. En ese mismo año, Schwinger, de 29 años de edad, empezó a desarrollar su propia versión de una QED consistente y covariante, aplicándola para calcular tanto el salto de Lamb como el momento magnético anómalo del electrón. La teoría de Schwinger era tremendamente compleja en su aspecto matemático, pero entre la jungla matemática se vislumbraban valores numéricos que concordaban perfectamente con los experimentos. Por ejemplo, el momento magnético del electrón se da por el factor g, que según la teoría de Dirac era exactamente 2, pero experimentalmente se sabía que era un poco mayor. Mientras que los experimentos en 1948 le daban un valor de 2,00236 para el factor g del electrón, Schwinger encontró de manera teórica que $g = 2{,}00232$. Schwinger presentó su reformulación covariante de QED en la primavera de 1948 en una reunión en Pocono Manor, una secuela de la reunión de Shelter Island. Aparecieron versiones publicadas de la teoría en un grupo de artículos en *Physical Review* entre 1948 y 1951. En el primero de estos artículos, una nota preliminar sobre el cálculo del momento magnético, Schwinger denotó que en su nuevo formalismo de QED, «la interacción entre masa y radiación produce una renormalización de la carga del electrón y de su masa, estando contenidas todas las divergencias en los factores de renormalización».

Sam Schweber ha resumido la significación del trabajo de Schwinger del siguiente modo: «Su método era general en el sentido de que daba paso a una electrodinámica cuántica consistente para ordenar $e^2/\hbar c$, y exhibía un hamiltoniano sin divergencia para ordenar $e^2/\hbar c$ que se podría considerar como el punto de arranque para describir un cuanto mecánicamente como cualquier sistema compuesto de electrones, positrones y fotones en la presencia de un campo de Coulomb externo. Lo que previamente eran piezas teóricas se soldaron y unificaron en una electrodinámica cuántica consistente y coherente para ordenar α [$= e^2/\hbar c$]» (Schweber 1994a, p. 309).

Aunque desconocida para Schwinger y los demás participantes en la conferencia de la isla Shelter, una teoría bastante similar a la de Schwinger ya había sido desarrollada en Japón por Sin-Itiro Tomonaga y sus colegas. Inspirado por algunas de las teorías de Dirac, Tomonaga desarrolló su aproximación de renormalización de la masa covariante a QED durante y poco después de la guerra, en parte junto con Ziro Koba y bajo circunstancias externas muy difíciles. Se dice que los físicos japoneses obtuvieron su primera información sobre el desplazamiento de Lamb a través de *Newsweek*. Después de haber contactado con Oppenheimer (que había organizado la conferencia de la isla Shelter y al tiempo actuado como una cámara de compensación de QED), en 1948 Tomonaga y sus colaboradores publicaron en *Physical Review* un resumen de su trabajo, incluyendo un cálculo del desplazamiento de Lamb. Tomonaga expresó su visión de la teoría de la renormalización como sigue: «La masa y la carga de los electrones que podíamos observar de hecho [son] las cantidades corregidas $m + \delta m$ y $e + \delta e$. Por consiguiente, [incluso] aunque los valores teóricos de $m + \delta m$ y $e + \delta e$ puedan ser infinitamente grandes, sus valores de hecho son finitos. Y por consiguiente, de nuevo, las dificultades del infinito en los valores en lugar de los teóricos $m + \delta m$ y $e + \delta e$ [...]. Resumiendo, podemos decir que hemos agrupado todas las dificultades relativas al infinito en la autoenergía de un electrón libre y en el problema de la polarización del vacío» (Schweber 1994a, p. 271). El importante trabajo de Tomonaga hasta cierto punto era paralelo al de Schwinger, pero ocurrió de manera aislada de la fase creativa de la QED americana y no influyó ni en Schwinger ni en Feynman.

La tercera versión de QED era la de Richard Feynman, otro joven teórico brillante. Feynman realizó su doctorado bajo la dirección de Wheeler en 1942 y su primer trabajo científico trataba de una nueva formulación de la electrodinámica clásica basada en interacciones directas entre partículas. La idea original de Feynman era la de resolver los problemas de divergencia en la teoría clásica en el sentido de su interpretación del campo libre, y después esperar que los problemas desaparecieran cuando la teoría fuera transferida a la mecánica cuántica. Aunque no ocurrió así, sus primeros trabajos le ayudaron a familiarizarse con un punto de vista espacio-tiempo general que posteriormente le llevó a la idea de formular la mecánica cuántica en términos de integrales de camino. En 1947, como resultado de la conferencia de Shelter Island y del cálculo de Beth del desplazamiento de Lamb, Feynman empezó a desarrollar su alternativa, una teoría altamente original de la QED. La teoría estaba basada en la formulación de las integrales de camino y en cálculos apoyados por una técnica de diagramas que

pronto se conoció como los diagramas de Feynman. Desarrolló la teoría en artículos entre 1948 y 1951 e incluyó las reglas para los famosos diagramas en su trabajo clásico «Aproximación espacio-temporal a la electrodinámica cuántica», aparecida en *Physical Review* en 1949. En este artículo, apuntó con satisfacción que, aunque todavía hubiera problemas teóricos, «sin embargo, parece que ahora tenemos disponible un método completo y definitivo para el cálculo de procesos físicos de cualquier orden en electrodinámica cuántica».

En el verano de 1948, existían dos versiones distintas de renormalización de la QED, la formulación Schwinger-Tomonaga y la formulación Feynman. Aunque las dos formulaciones daban los mismos resultados, la relación entre ambas distaba de ser obvia. La situación no era diferente de la existente entre la mecánica de matrices y la mecánica ondulatoria poco después de que la teoría de Schrödinger hubiera aparecido veintidós años antes. El que las dos teorías de QED fueran equivalentes de facto fue demostrado en 1949 en un trabajo importante de Freeman Dyson, un matemático inglés de 25 años, que había llegado dos años antes a la Universidad de Cornell para trabajar con la teoría cuántica de campos. En 1948, Dyson había completado el cálculo del desplazamiento de Lamb y reconocido que las teorías de Schwinger y Tomonaga eran simplemente dos formulaciones diferentes de la misma teoría física. El año siguiente derivó la teoría de Feynman a su propia manera, formulándola por primera vez como una teoría de campos, y probando que las teorías de Schwinger y Feynman eran equivalentes. Con la teoría sintética de Dyson, la nueva renormalización de la QED estuvo esencialmente completada.

La importancia de los eventos de finales de los años cuarenta que dieron lugar a la nueva QED se ve ilustrada con el hecho de que cinco de los físicos que contribuyeron a su desarrollo fueron galardonados con el premio Nobel: Lamb y Polykarp Kusch lo recibieron en 1955, el último por su determinación precisa del momento magnético del electrón, y Schwinger, Feynman y Tomonaga recibieron el premio en 1965; aunque la renormalización de la QED era claramente el trabajo de cuatro físicos –Schwingen, Tomonaga, Feynman y Dyson– éstos no fueron los únicos que trabajaron en el campo y que realizaron contribuciones a éste. Pero al contrario de la situación de mediados de los años veinte, cuando nació la mecánica cuántica, los físicos europeos y sus instituciones no desempeñaban ningún papel significativo en la fase formativa de la renormalización de la QED. Pauli, que había regresado a Zurich desde los Estados Unidos en 1946, siguió de cerca el desarrollo de la nueva teoría pero no contribuyó a su generación. El único europeo que realizó contribuciones originales a la QED (excepto Dyson, que en su contexto cuenta como un estadounidense) fue el excéntrico físico suizo Ernst Stueckelberg, quien alrededor de 1946 alcanzó muchos de los resultados obtenidos con posterioridad por Schwinger y Feynman. Los escritos de Stueckelberg, la mayoría en francés, fueron considerados muy difíciles y oscuros y su valor solamente fue reconocido en la década de los cincuenta, después de su muerte.

La historia de la QED de la posguerra temprana invita a varias observaciones. En primer lugar, que Schwinger y Tomonaga, que vivían en dos medios culturales muy

distintos, produjeron de manera independiente prácticamente las mismas teorías de QED renormalizada. Junto con otros ejemplos de la historia de ciencia, esto apoya la hipótesis de que el contenido cognitivo de la física no depende significativamente del entorno sociocultural. En segundo lugar, pocas veces un gran adelanto teórico importante había sido tan conservador en su naturaleza como la renormalización de la QED del final de los años cuarenta. No era, en realidad, una nueva teoría en el sentido de una teoría que repusiera o negara la QED de la preguerra, sino más bien la teoría antigua en un modo mejorado. Los jóvenes físicos clave estaban todavía al tanto de la continuidad y lucharon constantemente para mantener los principios de la teoría establecida. En un contraste claro a las actitudes revolucionarias de la generación de los mayores (gente como Dirac, Bohr y Heisenberg), el punto de vista de Schwinger, Feynman, Tomonaga y Dyson era esencialmente conservador y pragmático. Daban por supuestas la mecánica cuántica y la relatividad especial y se preguntaban cómo podrían usarse las dos teorías para formar una teoría consistente e útil de la QED. En tercer lugar, la actitud conservadora iba de la mano de actitudes que eran pragmáticas y básicamente no filosóficas. Para Feynman, la física estaba hecha de cálculo y comparación entre resultados calculados y experimentales, ni más ni menos. Feynman estaba de acuerdo con el credo positivista de Dyson, «no puedes realmente entender nada al menos que lo puedas calcular». En 1953, Dyson escribió sobre la QED: «Es el único campo en el cual podemos elegir un experimento hipotético y predecir el resultado hasta el nivel de cinco decimales, confiados de que la teoría toma en cuenta todos los factores relevantes. La electrodinámica cuántica nos da una descripción completa de lo que hace un electrón; por tanto, en un cierto modo, nos da un entendimiento de lo que es un electrón. Es sólo en la electrodinámica cuántica que nuestro conocimiento es tan exacto que podemos sentir que tenemos algo de conocimiento sólido de la naturaleza de una partícula elemental» (Schweber 1994a, p. 568).

Los auges y decadencias de la teoría de campos

Tras los exitosos avances de la QED de 1947 a 1949, existía gran esperanza de que métodos similares a los de la teoría cuántica de campos (TCC) fueran también aplicados a otras interacciones fundamentales. En cualquier caso, estas esperanzas no fueron cumplidas de inmediato. En palabras de Steven Weinberg, teórico eminente, en realidad lo que ocurrió en los años cincuenta fue esto: «No pasó mucho tiempo hasta que hubo otro colapso en la confianza: los títulos bursátiles de la teoría cuántica de campos se hundieron en la Bolsa de la física, y comenzó una segunda Depresión, que duraría al menos veinte años» (Weinberg 1977, p. 30). Había varias razones para explicar la crisis que a mediados de los cincuenta se manifestó en un desencanto generalizado de la TCC en la comunidad de física de altas energías, a pesar del éxito brillante de la teoría en QED. Entre ellos, que a unos pocos físicos les disgustaba la renormalización de QED, porque pensaban que estaba basada en una teoría equivocada y por tanto no podría ser verdaderamente una teoría fundamental. Se creyó de manera generalizada

que la renormalización era un truco matemático, pero a la mayoría de los jóvenes físicos no le importaba mientras que el truco funcionara. El primero entre aquellos a los que sí les importaba, era Dirac, cuyo trabajo en los años veinte y treinta había sido esencial para cualquier versión de la QED. Dirac creía firmemente que una teoría que se había despojado de los infinitos por procesos de renormalización era «fea», y por tanto equivocada, a pesar de sus logros instrumentales. Otro veterano de la mecánica cuántica, Lev Landau, no era menos crítico: junto con un grupo de teóricos rusos, Landau argumentaba que la TCC era sospechosa, ya que la teoría agregó conceptos inobservables, como la causalidad, los operadores de campos locales y la continuidad del espacio-tiempo en el nivel microfísico. En una conferencia en Kiev en 1959, Landau sugirió retirar la TCC como teoría fundamental, reponiéndola por una teoría basada en cantidades observables, como amplitudes de dispersión, y por el concepto de partículas de compuestos igualmente elementales.

La sugerencia radical de Landau fue alimentada por la falta de extensión de la teoría de campos tipo QED a las interacciones débiles y fuertes. La teoría de Fermi de la desintegración beta, así como la teoría «V – A» que Feynman y Gell-Mann publicaron en 1958 como una extensión de la no conservación de la paridad de la teoría de Fermi, fueron comprobadas como no renormalizables. También, cuando los físicos intentaron aplicar la TCC al estudio de interacciones fuertes, obtuvieron poco éxito. No había problemas específicos en formular TCC de interacciones fuertes renormalizables, pero estas teorías prácticamente no tenían ninguna utilidad, ya que no llevaban a predicciones fiables y, por consiguiente, efectivas más allá de su experimentación. Por éstas y otras razones, la TCC estaba en un punto bajo alrededor de 1960, cuando muchos físicos estaban dispuestos a seguir la recomendación de Landau y abandonar la teoría. De acuerdo con Dyson, «mucha gente ahora es profundamente escéptica con respecto a la relevancia de la teoría de campos en la física de interacciones fuertes. La teoría de campos está a la defensiva con respecto a la matriz *S* ahora de moda». Dyson creía que «es fácil imaginar que en unos pocos años los conceptos de teoría de campos desaparecerán del todo del vocabulario de trabajo diario en la física de altas energías» (*PT*, junio de 1965, p. 21). Weinberg, otro destacado teórico de campos, no era más optimista. En 1964 escribió que «todavía no está claro si la teoría de campos continuará desempeñando un papel en la física de partículas o si finalmente será suplantada por una pura teoría de matriz *S*» (Cushing 1990, p. 160).

La falta de confianza en la TCC, especialmente con relación a la física de interacciones fuertes, fue agravada por la presencia de una teoría alternativa fuerte, la teoría de matriz *S*. El cimiento de este tipo de teoría había sido formulado por Heisenberg ya en 1943 en un intento de desarrollar una electrodinámica cuántica relativista sin cantidades infinitas. El programa de Heisenberg de 1943 estaba modelado conscientemente en su mecánica cuántica de 1925 y, como esta teoría, basado por entero en términos de cantidades observables. Como tales cantidades, eligió la dispersión o matriz *S* representando la transición de un sistema físico de un estado inicial ψ_i a un estado final ψ_f. De manera formal, $\psi_f = S_{fi}\,\psi_i$ donde el cuadrado de la matriz de dispersión S_{fi}

daría la probabilidad de transición. Después de la guerra, la teoría de Heisenberg fue desarrollada por Christian Møller, Ernst Stueckelberg, Walter Heitler y otros, pero en 1950 el programa original en su mayoría había llegado a un alto. Con la llegada de la renormalización de la QED, la teoría matemáticamente compleja de Heidelberg no seguía pareciendo necesaria. En otras palabras, la idea de la matriz *S* seguía viva y, desde mediados de los cincuenta, se fue incorporando en la teoría de interacciones fuertes y se dio a conocer como «teoría analítica de la matriz *S*». Algunos físicos, incluidos Gell-Mann, consideraban la teoría de la matriz S como complementaria a la TCC o una manera alternativa de formular una teoría cuántica de campos de las interacciones fuertes. Pero otros teóricos, a partir de aproximadamente 1960, tomaron una posición mucho más radical, y enseguida llegaron a ver la teoría de la matriz *S* como antitética a la TCC. Además, dentro de este grupo de teóricos anticampos estaba Geoffrey Chew de la Universidad de California, Berkeley. En un discurso de 1961, Chew destacó sus ideas de una ruptura de la TCC y anunció una revolución por venir en la física fundamental. «La teoría convencional de campos», dijo Chew, «es estéril con respecto a las interacciones fuertes y [...] como un viejo soldado, está destinada no a morir sino simplemente a desaparecer poco a poco.» (Cushing 1990, p. 143). Dos años después, Chew expresó su creencia usando otra metáfora: «La nueva amante [la teoría de la matriz *S*] está llena de misterios pero de manera correspondiente llena de promesas. La antigua amante [TCC] está pegando zarpazos y arañando para mantener su estatus, pero sus días han pasado» (*ibid*, p. 175).

La esencia de la teoría de la matriz *S* de Chew, también conocida como teoría *bootstrap* («teoría del cordón de zapato» en castellano), se desarrolló de 1961 a 1966. Se puede resumir como sigue: al principio, Chew negaba que pudiera haber partículas elementales en el sentido reduccionista ordinario; esto es, consideraba que todas las partículas serían, por igual, compuestas, o, si se quiere, igual de elementales. Esta idea de *democracia nuclear* incluía la noción de un mecanismo de «cordones de zapato», es decir, que todos los hadrones deberían ser autogenerados a partir de la estructura matemática de la teoría. Por ejemplo, la masa del protón debe de tener el valor que tiene como consecuencia de la dinámica de las interacciones. (Este hecho es una reminiscencia de otras teorías muy ambiciosas, como la de Eddington.) En segundo lugar, la teoría estaba basada directamente en momentos de partículas. En un contraste severo con relación a la teoría de campos, ignoraba el supuesto concepto metafísico de un continuo espacio-temporal microfísico. Aunque la teoría era completamente consistente con la mecánica cuántica, no operaba con una función ondulatoria ψ (x, y, z, t) definida en cada punto en el espacio-tiempo. En tercer lugar, desde un punto de vista metodológico, la teoría de la matriz *S* de Chew era tan ambiciosa como radical. De acuerdo con la hipótesis *bootstrap*, todas las cantidades físicamente significativas podrían ser derivadas únicamente desde la matriz *S* como requisitos de autoconsistencia. Las masas, los espines y las masas de las partículas elementales de interacciones fuertes, así como el número de dichas partículas, deberían ser fijados por la teoría más que ser asignados empíricamente. «Los del *bootstrap* buscan entender la naturaleza no en tér-

minos de fundamentos sino a través de la autoconsistencia, creyendo que toda la física fluye únicamente a partir del requisito de que los componentes sean consistentes uno con el otro y consigo mismos. Ningún componente debería ser arbitrario.» (Chew 1970, p. 23). Como principio, sugirió Chew, una teoría como la teoría de matriz *S* podría explicar las leyes de la física como las únicas leyes posibles. Incluso habló de la teoría de matriz *S* como «la precursora de una nueva ciencia, tan radicalmente diferente en espíritu de lo que hemos conocido que resulta indescriptible con el lenguaje existente» (Cushing 1990, p. 180). En cualquier caso, Chew defendía una hipótesis de *bootstrap* limitada, esto es, una sólo válida para los hadrones. Negaba que la hipótesis del *bootstrap* pudiera ser generalizada a la física en un sentido global.

La teoría de matriz *S* fue muy influyente en la física de interacciones fuertes en los años sesenta. Atrajo filosóficamente a muchos físicos y consiguió varios éxitos científicos. Aunque muy pocos físicos siguieron a Chew en su cruzada anti-TCC, las ideas generales de la teoría de matriz *S* disfrutaron de gran popularidad: Gell-Mann y otros físicos se inspiraron en ella, y contribuyeron a la teoría de matriz *S* pero sin suscribir la idea de la democracia nuclear tan obviamente en conflicto con el concepto de los quarks. Para ellos, no existía ningún conflicto irreconciliable entre la TCC y una versión moderada de la teoría de matriz *S*. El programa de matriz *S* de Chew es un interesante ejemplo de una revolución fallida en la física; a finales de los años sesenta, sobrevivió con problemas y con los desarrollos con éxito de la física de quarks y la teoría de campos de gauge en los tempranos años setenta, el ambicioso programa más o menos se disolvió. La teoría de matriz *S* era en muchos aspectos una teoría grandilocuente e impresionante, pero prometía más de lo que podía ofrecer. Pronto se convirtió en tan desesperanzadamente compleja que más de un físico de finales de los sesenta la comparó con la astronomía de Ptolomeo poco antes de la revolución copernicana. Otro problema es que la teoría estaba efectivamente limitada a interacciones fuertes y no decía nada sobre las fuerzas débiles y electromagnéticas. Como argumentó un crítico, la teoría de matriz *S* «no es consistente con la teoría de campos electromagnéticos. Ya que el campo electromagnético está involucrado en las propias formas de medida y de observación, ésta es una limitación seria» (Stern 1964, p. 43). Al igual que el interés en TCC fue decreciendo en los años cincuenta, también el interés en la teoría de matriz *S* fue decreciendo en los años setenta. En ninguno de ambos casos fue resultado de teorías que fueran comprobadas como erróneas, sino más bien en su incapacidad para generar resultados nuevos experimentalmente relevantes, una incapacidad que en el caso de TCC era temporal. Es irónico que la comparación de Chew de 1961 de la TCC con un viejo soldado «que está destinado no a morir sino simplemente a desaparecer poco a poco» se validaría, no con respecto a la TCC, sino con respecto a su propia teoría de matriz *S*.

Campos de gauge y unificación electrodébil

A principios de los años setenta, la física de altas energías experimentó un desarrollo tormentoso que transformó el objeto de estudio en un estado al que se referían a

veces como «la nueva física». La novedad de la física de partículas de los setenta estaba basada principalmente en dos innovaciones teóricas: teorías gauge de campos cuánticos y cromodinámica cuántica. Mientras que el primer tipo de teoría era una teoría de campos general con aplicaciones en las teorías débiles en particular, la cromodinámica cuántica era una extensión de la teoría de quarks de interacciones fuertes o partículas hadrónicas.

El concepto de invariancia de gauge (o escalar) fue propuesto originalmente por Herman Weyl en su intento fallido de 1918 de unificar las teorías de electrodinámica y relatividad general. Cuando irrumpió la mecánica cuántica, Weyl y otros reformularon la idea para significar, explicado en brevedad, que la decisión de fase de una función ondulatoria no afecta a la ecuación ondulatoria. La teoría de Weyl de la invariancia cuántica de gauge apareció en 1929, pero desempeñó un papel muy limitado en el desarrollo ulterior de la teoría cuántica. Tuvieron que pasar 25 años hasta que hasta que el concepto se convirtió en un principio dinámico potente. En 1954, Yang y Robert Mills en el *I*nstitute for Advanced Study en Princeton intentaron construir una teoría de campos local de gauge invariante en interacciones fuertes, basado en la QED. La teoría de Yang-Mills estaba regida por un principio de simetría de gauge que aseguraba que las ecuaciones básicas eran invariantes con respecto a ciertas transformaciones dependientes de su posición y tiempo. Yang y Mills vieron que un triplete de bosones vectoriales pesados (espín 1, paridad positiva) estaba asociado con la teoría, del mismo modo que el fotón estaba asociado con la QED. Desgraciadamente no se conocía ninguna de estas partículas experimentalmente. Por la estrecha analogía entre la QED y la teoría de Yang-Mills se consideró a los bosones vectoriales como faltos de masa, correspondientes a una fuerza de largo alcance. Teniendo en cuenta que las fuerzas débiles y fuertes eran ambas de corto alcance, no estaba claro a qué área de la naturaleza se podrían aplicar, si es que era aplicable en algún sitio. La teoría de Yang y Mills fue considerada como matemáticamente interesante, pero con muy poca o ninguna utilidad física. Se necesitó una década hasta que se dieron cuenta que esta teoría «inútil» era, de hecho, de una importancia esencial para una nueva tradición teórica de campos de gauge destinada a cambiar la física de altas energías.

Ya en el año 1938, en la conferencia de Varsovia, Oskar Klein había sugerido que una partícula de espín 1 mediaba en la desintegración beta y desempeñaba un papel en las interacciones débiles similar a la del fotón en el electromagnetismo. La hipótesis de Klein era parte de un intento de formular una teoría de campos unificada que incluyera fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas, por usar una terminología posterior. La especulación no fue muy conocida, pero casi veinte años después, fue retomada por Schwinger en un intento de producir una teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas. La teoría tentativa de Schwinger de 1957 incluía la idea de que el fotón y las dos partículas de intercambio cargadas de Yang-Mills (W^+, W^-) eran miembros de la misma familia. Cuatro años más tarde, Sheldon Glashow, otro físico de Harvard, sugirió una teoría de interacciones débiles de gauge con tres partículas de intercambio enormes. En añadidura a W^+ y W^-, incluía una partícula neutra Z^o. La teoría

de Glashow, y una similar producida por Abdus Salam y John C. Ward en Inglaterra, describieron las interacciones tanto electromagnéticas y como débiles, la primera con conservación de la paridad y la segunda con una violación de la conservación de la paridad. Las masas de los bosones de vector intermedio no se derivaban de la teoría, sino que fueron elegidas para asegurar la concordancia con el conocimiento experimental. De hecho, la teoría no era capaz de explicar por qué los bosones vectoriales, al contrario que el fotón, podían tener masa alguna.

Una versión mejorada del modelo Glashow-Salam-Ward fue desarrollada en 1967, publicada primero por Steven Weinberg y poco después por Salam, un teórico paquistaní que trabajaba en el Imperial College de Londres. La teoría electrodébil de Weinberg y Salam, ganadora del premio Nobel, hizo uso de un concepto conocido como ruptura de la simetría espontánea, que originalmente había sido presentado en 1961 en el contexto de la teoría de la superconductividad por Yoichiru Nambu y otros. Con la inspiración del trabajo de Nambu, el teórico británico Peter Higgs sugirió en 1964 un mecanismo por el cual podrían generarse las masas de la partícula en las teorías de gauge de Yang-Mills. Una sugerencia similar fue realizada de modo autónomo por Robert Brout y François Englert en Bélgica. Weinberg y Salam aplicaron el mecanismo de Higgs para determinar las masas de partículas en su teoría de gauge de ruptura espontánea electrodébil. El artículo de Higgs sobre la ruptura espontánea de simetría generadora de masa, ahora reconocido como un artículo clave en la física teórica, fue rechazado al principio por *Physical Letters*. Llegó en un tiempo en el cual la física de partículas estaba muy dominada por la teoría de la matriz *S* y la TCC no estaba de moda. Como llegó a decir después Higgs, «siendo consciente de que mi artículo se quedaba corto en cuanto a palabrería de vendedor», rehizo el artículo, y lo presentó a *Physical Review Letters* (Hoddeson *et al.*, 1997, p. 508). Esta vez fue aceptado.

En los años setenta, la teoría Weinberg-Salam fue reconocida como una contribución pionera al programa de unificación naciente, pero, en sus primeros años, la teoría fue ampliamente ignorada. Esa falta de impacto temprana se ilustra por el número de citas, expresado aquí entre paréntesis, del artículo de Weinberg: 1967 (0), 1968 (0), 1969 (0), 1970 (1), 1971 (4), 1972 (64), 1973 (162), 1974 (242). Las cifras incluyen referencias propias, lo que indica que Weinberg no encontró su propio trabajo especialmente importante al principio. El cambio en su recibimiento en 1972 se relacionó con el reconocimiento de que la teoría de Weinberg-Salam no era sólo una teoría de gauge electrodébil coherente, sino que también era renormalizable y, por tanto, compartía con la QED las propiedades deseables de predictibilidad y calculabilidad. Esto fue hecho público por primera vez en 1971, por el físico holandés de 25 años Gerardus t'Hooft, que probó que una clase amplia de teorías simétricas de gauge (no abelianas), a las cuales pertenecía la teoría electrodébil, eran renormalizables. Otra versión de la prueba fure producida poco después por Benjamin Lee, un físico coreano-estadounidense. Las pruebas de t'Hooft y Lee fueron extremadamente importantes. Sólo entonces la teoría de Weinberg-Salam se convirtió en una teoría aplicable y, más en general, las teorías de campo de gauge fueron reconocidas como pro-

fundas teorías de interacciones. Como expresó en un artículo el físico Sidney Coleman sobre los premios Nobel entregados a Glashow, Weinberg y Salam, el artículo de t'Hooft «revelaba la rana de Weinberg y Salam como un príncipe encantado» (*Science*, 14 de diciembre de 1979). La revolución del campo de gauge que comenzó en 1971 alumbró de nuevo a la TCC.

La teoría de Weinberg-Salam era renormalizable y teóricamente atractiva, pero ¿era también correcta en el sentido de ser coherente con los experimentos? Como el modelo anterior de Glashow, la teoría predecía un socio enorme y neutro del fotón que mediaría en interacciones débiles sin transiciones de carga entre partículas entrantes y salientes. Tales procesos de «corriente neutra», con participación de la hipotética Z^o como partícula mensajera, distinguían el modelo unificado de Weinberg-Salam de teorías anteriores de interacciones débiles. Hasta que se establecieron experimentalmente las corrientes neutras, la teoría Weinberg-Salam no podía ser considerada como una teoría empíricamente satisfactoria. Ambas corrientes neutras fueron sembradas en los Estados Unidos (Fermilab) y en Europa (CERN). En el verano de 1973, los experimentadores del CERN anunciaron su descubrimiento de la corriente neutra débil, basada en el análisis de procesos entre neutrones y neutrinos. El instrumento crucial en el éxito del CERN fue «Gargamelle», una cámara de burbujas de construcción francesa de 20 toneladas. Los resultados del CERN fueron confirmados finalmente por experimentos de neutrinos realizados en el Fermilab en 1974, aunque la confirmación no llegó de manera fácil. Existía una duda considerable con respecto a los resultados y, durante un tiempo, los físicos estadounidenses –y con ellos la mayoría de los físicos de altas energías– creían que las corrientes neutras no existían y que los físicos del CERN se habían equivocado. Sin embargo, en verano de 1974, las incertidumbres habían desaparecido y desde entonces las corrientes neutras se consolidaron de manera firme. El descubrimiento de corrientes neutras llevó a la confirmación de la teoría de gauge de Weinberg-Salam de 1967.

La teoría de Weinberg-Salam era una teoría de interacciones electrodébiles y a través del modelo del quark, tenía una relación obvia con las interacciones fuertes. Al principio, desde más o menos 1967 a 1974, parecía que los cuatro leptones (e, ν_e, μ, ν_μ) se correspondían con los cuatro quarks (u, d, s, c) de acuerdo con lo que se esperaría de un punto de vista unificador. En 1974, Martin Perl y sus colaboradores analizaron sus datos de colisiones electrón-positrón recopilados en el SPEAR, el anillo de almacenaje de electrón-positrón, o colisionador, recientemente terminado en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). El grupo de Stanford encontró evidencias de una nueva partícula, posiblemente un leptón superpesado (tau, τ), producido en pares y que se desintegra en muones o electrones ($e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \nu_\tau \nu^-_\tau \nu_\mu \nu^-_\mu$). Los datos analizados por Perl y su grupo no fueron aceptados inmediatamente como prueba de un leptón τ y ya final de 1975, Perl y sus 35 colaboradores escribieron precavidos que «no tenían una explicación convencional» para los datos; como explicación no convencional, sugirieron «la producción y desintegración de un par de nuevas partículas, cada una con una masa entre 1,6 y 2,0 GeV/c^2» (Cahn y Goldhaber 1989, p. 300). Sa-

bían que habían descubierto algo nuevo, pero no estaban seguros de lo que era. Como indicativo de su incertidumbre, a veces se referían a la nueva partícula como *U*, por «desconocida» (del inglés *unknown*). (De forma incidental, 40 años antes, Yukawa introdujo otra partícula *U*, denominada posteriormente pión.) La confusión terminó un año después con una serie de experimentos en el PETRA (Positron-Electron Tandem Ring Accelerator) de Hamburgo, parte de la instalación de altas energías DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron). Los experimentos alemanes confirmaron los resultados de Stanford, y sirvieron de prueba final de la existencia de un leptón muy pesado, 1,8 GeV y con un tiempo de vida de 10^{-13} segundos. Se dio por supuesto al neutrino tau acompañante por más que detectado. La aceptación del leptón tau (o tauón) implicaba que la simetría entre quarks y leptones –o entre interacciones fuertes y débiles– ya no se satisfacía. Se necesitaban dos nuevos sabores de quarks y, como veremos enseguida, después se encontraron. A finales de los años setenta, la cromodinámica cuántica y la TCC se asociaron de manera cercana a la teoría electrodébil. Naturalmente ahora el reto era repetir los éxitos de la QED y extender la teoría electrodébil de Weinberg-Salam al reino de las interacciones fuertes (véase capítulo 27).

En su reseña de 1979, antes mencionada, Coleman describió el desarrollo de la teoría electrodébil a lo largo de los años setenta del siguiente modo:

> En 1973, los experimentos del CERN y Fermilab detectaron procesos con corrientes neutras [...] con una forma y magnitud consistentes con la teoría. Los cinco años siguientes fueron un periodo confuso de euforia y desencantos, alarmas y excursiones. Un experimento confirmaba la teoría; otros experimentos negaban la teoría. Un esfuerzo teórico enorme se dedicó a producir versiones mutantes grotescas de la teoría concordantes con los nuevos resultados experimentales; los nuevos experimentos se vieron que estaban equivocados; los mutantes fueron decapitados. En los siguientes años, sin embargo, la situación experimental parece que se había estabilizado de acuerdo con la versión original de 1971 de la teoría. El modelo de Weinberg-Salam es ahora la teoría estándar de las interacciones débiles.

Los «mutantes» mencionados por Coleman se referían a las teorías designadas a explicar anomalías que no podrían en principio estar de acuerdo con la teoría Weinberg-Salam.

El éxito de la teoría electrodébil era incompleto en tanto que los tres «weakons» –los bosones vectoriales intermedios– eran todavía partículas hipotéticas. Esta situación cambió a principios de los ochenta, cuando los nuevos colisionadores protón-antiprotón del CERN y Fermilab ya producían las energías necesarias para generar las enormes partículas. El experimento del CERN era de coste relativamente bajo, basado en una tecnología que hacía uso de instalaciones existentes para almacenaje de antiprotones en un anillo y haciéndoles colisionar con protones en el mismo anillo. El colisionador del CERN empezó a producir colisiones en verano de 1981 y, en otoño de 1982, aparecieron las primeras evidencias de partículas *W* enormes. El 21 de ene-

ro de 1983, los físicos del CERN anunciaron que habían encontrado diez candidatos de partículas W que se desintegran en un electrón y en un neutrino. La masa W se vio que era alrededor de 80 GeV, de acuerdo con la teoría. Medio año después, la partícula Z fue detectada a través de su desintegración en $e^+ e^-$ y $\mu^+ \mu^-$, y le fue asignada una masa de unos 95 GeV. Ninguno de estos descubrimientos resultaron ser grandes sorpresas. Fueron rápidamente confirmados en experimentos sucesivos en el CERN y Fermilab, y los físicos del CERN Carlo Rubbia y Simon van der Meer fueron velozmente galardonados con el premio Nobel de 1984 por el descubrimiento. El italiano Rubbia era la fuerza motora detrás del programa experimental y el pionero del colisionador protón-antiprotón; la tecnología esencial de producción de proyectiles en rayos concentrados fue desarrollada por Van der Meer, un técnico físico holandés. Había, por supuesto, muchos más físicos involucrados en el descubrimiento que los dos ganadores del premio. La escala de la física de altas energías se ilustra por el hecho de que los dos artículos del descubrimiento (uno de cada uno de los grupos detectores denominados UA1 y UA2) fueron firmados por no menos de 126 físicos de once instituciones diferentes.

La cromodinámica cuántica

Como se mencionó en el capítulo 21, en 1964 Gell-Mann y Zweig propusieron que los hadrones (partículas fuertemente interactuantes) consistían en partículas fraccionalmente cargadas llamadas quarks. A mediados de los años sesenta, el modelo de los quarks no llamaba mucho la atención, y le llevó casi una década llegar a ocupar una posición central en la física de interacciones fuertes. Los experimentos desarrollados en 1967 por físicos del SLAC y del MIT con la dispersión inelástica de electrones en protones dieron resultados que confundieron a los teóricos, hasta que Feynman interpretó las secciones eficaces de dispersión inusual como una señal de que el protón contenía centros de dispersión de tipo puntual. Feynman, que publicó por primera vez su teoría en 1972, sugirió que el protón, al igual que otros hadrones, estaba formado por una niebla indefinida de partículas duras de tipo puntual a las que llamó partones. En colisiones de alta velocidad, los partones esencialmente actuarían como partículas independientes. El modelo de partones de Feynman proveía un marco adecuado para entender muchos experimentos y enseguida fue ampliamente aceptado. Muchos físicos tendieron a identificar los partones con los quarks, y a no tener en cuenta las diferencias considerables que existían entre las descripciones de ambos hadrones. Por ejemplo, mientras que los quarks estaban estrechamente entrelazados entre los hadrones, los partones de Feynman eran en esencia entidades libres. La hipótesis partón = quark recibió apoyo en 1971, cuando los experimentos en el SLAC fueron interpretados en términos de partones con un espín de un medio. Un apoyo aun mayor vino de los experimentos de dispersión de neutrino-protón del CERN, donde la nueva cámara de burbujas Gargamelle produjo evidencias convincentes para el modelos de los partones. Los resultados publicados por el grupo Gargamelle en 1973–1975 se aceptaron gene-

ralmente como prueba de que los partones eran quarks fraccionalmente cargados, una conclusión que también estaba apoyada por experimentos con reacciones de hadrones.

Un apoyo mayor para el modelo de partones llegó de la mano de los desarrollos en la teoría. En 1973, los teóricos estadounidenses David Politzer, Frank Wilczek y David Gross descubrieron que las teorías de campo de gauge de tipo Yang-Mills eran «asintóticamente libres», queriendo decir que en distancias muy cortas (o ante energías muy altas), la fuerza gradualmente se aminoraría y tendería asintóticamente hacia cero. Este resultado importante explicaba cómo el modelo de Feynman con los partones libres podría ser tan exitoso: concordaba con todos los hechos conocidos de la física de hadrones y hacía posible cálculos detallados. En general, la libertad asintótica dio un apoyo fuerte a la validación de la TCC y allanó el camino para la teoría de quarks de campo de gauge. En el modelo de quarks original, el quark estaba caracterizado por el número cuántico «sabor», que podría ser tanto *u*, *d* o bien *s*. Que era deseable un segundo número cuántico fue sugerido más adelante en 1964 por Oscar Greenberg, de la Universidad de Maryland. Greenberg apuntó que la composición quárkica de algunas partículas elementales, tales como $\Omega^-(sss)$, no se adecuaba al principio de Pauli si los tres quarks eran idénticos. Su sugerencia fue desarrollada el año siguiente por Nambu y otros teóricos de gauge. De acuerdo con Nambu, los quarks llevaban un «color» además del sabor, por lo que cada sabor de quark se relacionaba con tres colores («rojo», «verde» y «azul»). El color se veía como una analogía de la carga eléctrica, pero no se esperaba que tuviera ninguna relevancia en los hadrones conocidos, los cuales eran considerados como incoloros. Por esta razón, el color quárkico fue por una temporada considerado sólo de interés teórico. Los experimentos de principios de los años setenta mostraron, sin embargo, que éste no era el caso. Los experimentos indicaron que el color sí existía y que los quarks coloreados estaban cargados fraccionalmente del mismo modo que los quarks de sabores.

El estatus de la cromodinámica cuántica –la teoría de campo de gauge de interacciones fuertes– cambió drásticamente en otoño de 1974, en un tiempo en que el término cromodinámica cuántica y su acrónimo CDC (en inglés QCD, en analogía con QED), no habían sido acuñados aún. (Los nombres parece que fueron propuestos por Gell-Mann y aparecieron por primera vez en 1978.) El 11 de noviembre de 1974 dos grupos de físicos estadounidenses anunciaron que habían descubierto una partícula elemental altamente inusual, que fue considerada como una manifestación del sabor *quárkico «charm»* o encanto. Que tal sabor debería existir había sido sugerido por Glashow y James Bjorken poco después del desarrollo de la teoría original de quarks de Gell-Mann y Zweig. El quark encantado tendría dos tercios de la carga eléctrica del positrón, y mientras que el encanto (como la extrañeza) se conservaría en interacciones fuertes y electromagnéticas, no se conservaría en interacciones débiles. En cualquier caso, la hipótesis Glashow-Bjorken fue ignorada durante varios años porque no tenía apoyo experimental. El descubrimiento de los quarks encantados en la «revolución de noviembre» no solo confirmó la teoría de los quarks, sino que también significó un gran triunfo para la teoría de gauge en general y la cromodinámica cuántica en particular.

Los datos sobre la aniquilación electrón-positrón de 1972-1973 no se correspondían con las expectativas teóricas y fueron vistas ampliamente como una amenaza contra el modelo partón-quark. Pero esta situación incómoda cambió de forma abrupta, de un fracaso amenazante a un total éxito, cuando la partícula J/ψ fue descubierta en noviembre de 1974. La partícula fue detectada en unos experimentos de colisión protón-núcleos en Brocaban por un grupo liderado por Samuel Ting y, en experimentos de colisión electrón-positrón en el SPEAR de Stanford, por un grupo liderado por Burton Richter. El grupo de Ting ya tenía evidencias del mesón pesado desde hacía varios meses, pero no estaba seguro de si la prueba era real o debida a algún artificio. Sólo cuando Ting oyó hablar de los resultados del SPEAR, se dio cuenta de que había realizado un descubrimiento. Ting y Richter compartieron el premio Nobel de 1976 por el descubrimiento de la partícula que Ting llamó J y Richter ψ, por tanto normalmente se la conoce por el nombre compuesto J/ψ. La partícula tenía un tiempo de vida inusualmente largo y, con una masa de 3,1 GeV (tres veces la de un protón), inusualmente grande. Estaba producida por los cuantos gamma de la aniquilación electrón-positrón y se desintegraba en hadrones. Unas pocas semanas más tarde, otro nuevo vector mesón (ψ') de masa 3,7 GeV fue descubierto y otras partículas enormes y de larga vida pertenecientes a la misma familia le siguieron durante los siguientes años. La razón por la cual se consideraba de tanta importancia a J/ψ era que ella y las otras partículas nuevas eran percibidas como manifestaciones de un nuevo sabor quárkico llamado *encanto*. Por ejemplo, la J/ψ se veía como una combinación de un quark con encanto y su antiquark. Para explicarlo con brevedad, el encanto fue descubierto en la revolución de noviembre y el descubrimiento convirtió la cromodinámica cuántica y el modelo quárkico en realidad. Se sumó al descubrimiento de quarks (confinados) como constituyentes reales de hadrones. La existencia de encanto fue corroborada más tarde cuando se descubrieron los mesones D en 1976; éstos se interpretaron como estados de encanto desnudo, esto es, combinaciones de quarks «ordinarios» (d) y quarks encanto. La inmensa mayoría de físicos concluyó que los quarks habían sido descubiertos como partículas reales, no como meros objetos matemáticos. Muy pocos escucharon a los que quedaban abogando por la democracia nuclear y aun menos al envejecido Heisenberg, que en los años setenta sostenía que una teoría unificada debía estar basada en las simetrías subyacentes de las ecuaciones, más que en la noción de partículas elementales.

En 1976, se reconocía la existencia de cuatro tipos de quark: *u, d, s* y *c*. Con el descubrimiento del leptón tau y el reconocimiento de que pertenecía a una «tercera generación» de partículas fundamentales, la simetría quark-leptón se rompió una vez más. Para poder restaurarla harían falta dos nuevos sabores de quarks. Uno de los sabores deseados se produjo enseguida. En 1977, Leon Lederman, de la Universidad de Columbia, anunció que su grupo en el Fermilab había encontrado en aniquilaciones de $\mu^+ \mu^-$ evidencia de una partícula muy pesada de masa 9,5 GeV (casi diez veces la masa del protón). La partícula, llamada ypsilón, se vio como una manifestación de un quinto sabor quárkico. Así como los experimentos de 1974 se interpretaron como un des-

cubrimiento de los quarks encanto, también en el experimento de 1977 se vio como el descubrimiento del quark b (b por *bottom*, «inferior», o *beauty*, «belleza») con carga eléctrica –1/3. La composición del quark ypsilón se interpretó como $b\bar{b}$. El sexto y último quark, el quark *t* (*t* por *top* o «superior», o «*truth*», verdad) no apareció en los experimentos hasta muchos años después, pero a pesar de la falta de evidencia experimental, se asumía en general como existente. En 1980, el número de quarks aceptados se había incrementado a seis (*u, d, s, c, b* y *t*), correspondientes a los seis leptones (tabla 22.1). Para completar la historia, un grupo de físicos del Fermilab al final descubrió el quark top en 1995. La masa extremadamente grande de este quark, medida en el experimento como de 176 GeV, coincidía con la teoría y el descubrimiento fue, por tanto, un éxito más de la cromodinámica cuántica y de la teoría electrodébil.

Con el descubrimiento de los nuevos mesones y quarks, la cromodinámica cuántica vino a dominar la física de interacciones fuertes. De acuerdo con esta teoría, los hadrones consistían no solo en quarks, sino también en los «gluones» sin masa, que mantenían juntos a los quarks. Como entidades teóricas, los gluones eran estudiados desde 1971, cuando algunos físicos interpretaron la prueba de partones neutros como el pegamento que sujetaba a los quarks fraccionalmente cargados juntos dentro de los hadrones. Los gluones adquirieron una medida de realidad en 1979, cuando los experimentos en el nuevo anillo de almacenamiento del PETRA identificaron «eventos de tres chorros» que fueron interpretados como interacciones entre quarks y gluones. Se

TABLA 22.1
Partículas fundamentales conocidas alrededor de 1995

Nombre(s)	*Símbolo*	*Carga eléctrica (e)*	*Masa en reposo (MeV)*
Quarks			
up	*u*	+2/3	360
down	*d*	–1/3	360
extraños	*s*	–1/3	540
encanto	*c*	+2/3	1.500
bottom	*b*	–1/3	5.000
top	*t*	+2/3	176.000
Leptones			
electrón	e	–1	0,51
muón	μ	–1	107
tauón	τ	–1	1.784
neutrino electrónico	ν_e	0	0
neutrino muónico	ν_μ	0	0
neutrino tauónico	ν_τ	0	0

Nota: No se incluyen las antipartículas.

suponía que los electrones y positrones colisionadores iban a reaccionar de acuerdo con el esquema $e^- e^+ \rightarrow q\bar{q}g$, donde la *g* denota un gluón. Aunque los físicos europeos subrayaban que no habían «descubierto» realmente los gluones, así es como fueron interpretados los experimentos en general por la prensa, y no sin la ayuda de los físicos estadounidenses. La situación hizo que la publicación británica *New Scientist* se preguntara: «la prueba [de la existencia de gluones] es, por tanto, débil, ¿entonces, por qué a estos resultados se les ha dado tanta importancia, sobre todo en los Estados Unidos?». La respuesta en la revista era ésta: «La única conclusión parece ser que los físicos de partículas estadounidenses intentan por todos los medios mantener el impulso de los fondos federales para su costosa forma de experimentación. La batalla está en la siguiente generación de aceleradores, para conseguir energías más altas, por lo que los físicos necesitan demostrar que el gasto futuro es una buena inversión» (Pickering 1984a, p. 344). Sin embargo, el descubrimiento probó ser real y consistente; a finales de 1979, otros experimentos en el PETRA y en otros laboratorios confirmaron la interpretación, y, en general, la detección del guión fue finalmente aceptada.

CAPÍTULO 23

La cosmología y el renacimiento de la relatividad

Hacia el universo del *big bang*

Si 1932 fue el *annus mirabilis* de la física nuclear y el comienzo de la física de partículas, el año 1917 podría celebrarse como el del nacimiento de la cosmología racional. El estudio científico de toda la amplitud del universo se apoyó en una nueva estructura cuando Einstein sugirió sus ecuaciones de campo cosmológicas basadas en su teoría general de la relatividad, recientemente propuesta. El título del trabajo pionero de Einstein, publicado en el *Proceedings of the Prusian Academy of Sciences* en el ecuador de la Primera Guerra Mundial, fue «Consideraciones cosmológicas concernientes a la teoría general de la relatividad». Ocho años más tarde, el trabajo de Einstein todavía se consideraba como el cimiento de la cosmología científica.

Cuando Einstein publicó su teoría, el conocimiento observacional de las estadísticas y el movimiento de las galaxias era exiguo, y la separación entre la cosmología teórica y observacional, abismal. Aunque las primeras medidas de recesión galáctica se remontan a 1912, y algunos astrónomos en los años veinte intuyeron una relación entre la distancia y la velocidad recesional, en general las observaciones no desempeñaron un gran papel en la primera fase de la cosmología relativista. En esta fase, entre 1917 y 1930, se aceptaba en general que el universo era estático, y el principal problema que ocupaba a los cosmólogos teóricos tenía que ver con la comparación entre los dos modelos estáticos que satisfacían las ecuaciones de campo. Según el modelo de Einstein, el universo era cerrado, mientras que era abierto e infinito (pero sin masa) de acuerdo con el modelo sugerido en 1917 por Willem de Sitter en los Países Bajos. No fue hasta 1930, después de que Edwin Hubble estableciera que las galaxias se separan con una velocidad proporcional a su distancia en que el paradigma estático se rompió y se dieron cuenta de que el universo se expande. A este importante punto de vista ya había llegado el belga Georges Lemaître en 1927, y la teoría fue argumentada por el ruso Alexander Friedmann ya en 1922. Los trabajos de Friedmann y Lemaître fueron ignorados hasta

que se redescubrieron en 1930. Durante las dos décadas siguientes, la mayoría de astrónomos y físicos aceptaban que el universo estaba en expansión, de acuerdo con los datos de Hubble y las soluciones de Friedmann-Lemaître de las ecuaciones relativistas de campo. El modelo cosmológico más popular probablemente fuera el modelo de Lemaître-Eddington, según el cual el universo comenzó su expansión a partir de un estado estático, como el propuesto por Einstein, hace un tiempo infinito. Otro modelo evolucionista fue sugerido por Lemaître en 1931, a saber, que la expansión comenzó a partir de un «átomo primigenio» y, por tanto, al universo se le podría adscribir una edad definida. El primer modelo de *big bang* (gran explosión) fue recibido con frialdad al principio, pero a finales de los treinta, la idea general de un universo evolutivo de edad finita descrito por las leyes de la relatividad general ganaba respeto de modo creciente. Los cimientos relativistas no fueron aceptados por todos los especialistas, a pesar de todo, y existían numerosas teorías rivales, de las cuales la alternativa de Edward Milne fue la más debatida (véase capítulo 15).

Los cosmólogos del periodo de entreguerras no tenían una identidad profesional. Consistían en una mezcla irregular de matemáticos, físicos teóricos, astrónomos y químicos físicos que se dedicaban a tiempo parcial a los problemas cósmicos. Aunque los aspectos físicos del universo desempeñaron un papel secundario respecto a los aspectos geométricos o los espacio-temporales, las consideraciones de los procesos físicos no estaban ausentes del todo: por ejemplo, en una serie de artículos publicados entre 1928 y 1933, el fisicoquímico y especialista en relatividad estadounidense Richard Tolman investigó la termodinámica de los universos tanto estáticos como en expansión. Ya en 1922, Tolman había estudiado el equilibrio entre hidrógeno y helio, en un intento infructuoso de explicar las relativas abundancias de los dos elementos. La física cuántica entró por primera vez en la cosmología, aunque de una manera vaga y especulativa, con la breve nota de Lemaître en 1931 sobre la teoría del *big bang* titulada significativamente «El principio del mundo desde el punto de vista de la teoría cuántica». El físico belga describió el universo original como «un cuanto único» en el cual se dio «un tipo de proceso superradiactivo» con la producción de elementos súper pesados y radiactivos como resultado. Sugirió que las partículas emitidas por los hipotéticos superátomos estarían aún entre nosotros en forma de rayos cósmicos. Las especulaciones de Lemaître eran audaces, visionarias y poéticas; desdichadamente estaban también desconectadas del progreso de la física nuclear que empezó a acelerarse en la época. El desarrollo fructífero que finalmente estableció a la cosmología como una rama de la ciencia física tuvo sus comienzos a finales de los años treinta, cuando unos pocos físicos nucleares se interesaron por problemas astrofísicos tales como la producción de energía estelar y la abundancia de distribución de los elementos.

La astrofísica nuclear fue dando sus pasos pioneros a finales de los años veinte de la mano de Atkinson, Houtermans y Gamow; el subcampo obtuvo su primer éxito arrollador con la celebrada teoría de Bethe de 1938-1939 (véase capítulo 12). El trabajo de Bethe era una teoría de producción de energía estelar, no de formación de elementos, y por esta razón no se consideró directamente relevante para la cosmología. La prime-

ra teoría nuclear-cosmológica fue incluida en la teoría de Von Weizsäcker de 1938, una versión más primitiva de la teoría algo más tardía de Bethe. Von Weizsäcker desarrolló grandiosamente el programa nuclear-arqueológico –esto es, el intento de reconstruir la historia del universo a través de los hipotéticos procesos nucleares y verificarlos por el modelo resultante de abundancias de elementos o, como expresó en el *Physikalische Zeitschrift*, «dibujar desde la frecuencia de distribución de los elementos conclusiones de un estado primitivo del universo en el cual esta distribución haya podido originarse»–. Según Von Weizsäcker: «Es bastante posible que la conclusión de la formación de los elementos tomara lugar antes del origen de las estrellas, en un estado del universo significativamente diferente al de hoy, [y con] una temperatura de un orden de magnitud de la cual se derivaría la transformación completa de la energía de enlace nuclear en calor [aproximadamente 2×10^{11} K]. La densidad que lo acompaña está, de forma similar, también en el entorno de la densidad del núcleo» (Kragh 1996b, p. 98). La descripción de Von Weizsäcker era, por tanto, la de un universo del *big bang*. Aunque estaba desarrollado de manera independiente, su modelo tenía mucho en común con la hipótesis del átomo primigenio de Lemaître.

El programa iniciado por Von Weizsäcker fue continuado independientemente por Gamow hacia un modelo del universo temprano de cimiento físico-nuclear. Es notable que ni Gamow, ni Bethe, ni Von Weizsäcker tuvieran ninguna formación sólida en astronomía. Confiados en el poder de la teoría nuclear y cuántica, entraron en el campo como físicos y fueron aprendiendo la astronomía necesaria a lo largo del camino. En 1939, Gamow subió el peldaño desde las estrellas hasta el universo, dándole vueltas a la noción de un universo del *big bang* pero todavía sin saber cómo se habían formado los elementos desde el estado hipotético del hidrógeno primigenio. El problema era reproducir una distribución de elementos que se correspondiera con lo que se conocía de modo empírico, que en la época eran los datos publicados por Victor Goldschmidt en 1937. En la octava conferencia de Washington sobre física teórica, llevada a cabo en abril de 1942 –cuatro meses antes de que los Estados Unidos declararan la guerra contra Japón, Alemania e Italia– Gamow y otros físicos estadounidenses llegaron a la conclusión de que un universo del *big bang* era necesario para considerar de modo cualitativo los datos de Goldschmidt de los elementos más pesados. De acuerdo con el informe de la conferencia, «los elementos se originaron en un proceso de carácter explosivo, el cual tomó lugar "en el comienzo del tiempo" y resultó en la expansión presente del universo» (Kragh 1996b, p. 105).

El modelo del *big bang* estaba ganando impulso y su fuerza motriz era la física nuclear. Ahora se daban cuenta, entre un pequeño grupo de físicos y astrónomos, de que la materia bruta del mundo actual era probablemente el resultado de lo que pasó en un estadio primitivo altamente comprimido y caliente hace dos mil millones de años (el tiempo comúnmente aceptado en la época de Hubble, apenas la edad del universo). Éste fue un cambio conceptual enorme, pero en aquella época no provocó ningún titular de prensa: no sólo se estaba desarrollando una guerra, sino que la conclusión también era provisional y especulativa. Lo que le faltaba para poder desarrollarse en

una cosmología grande y adecuada del *big bang* era una conexión entre la física nuclear del universo temprano y los modelos relativistas de la evolución cosmológica. Durante la Segunda Guerra Mundial, tales problemas esotéricos disponían de una prioridad baja, pero poco después del final de la guerra, Gamow convirtió el problema en algo prometedor. El 24 de octubre de 1945, Gamow felicitó a Bohr en su 60.º cumpleaños. «[Estoy] estudiando el problema del origen de los elementos en las primeras etapas del universo en expansión», dijo Gamow a Bohr. «Esto supone reunir las fórmulas relativistas de la expansión con las razones de las reacciones termonucleares y de fisión. Un punto interesante es que el periodo de tiempo durante el cual tuvo lugar la fisión original (tal como fue estimado a partir de las fórmulas de la expansión relativista) debió de haber sido menor que un milisegundo, mientras que apenas una décima de segundo estaba disponible para que se estableciera el ulterior equilibrio termodinámico (de haberlo) entre los diferentes núcleos más ligeros» (Kragh 1996b, p. 106).

La nueva aproximación de Gamow, tal como fue presentada en 1946, estaba basada en una descripción del universo temprano consistente en un gas de neutrones relativamente frío y en expansión, de acuerdo con las ecuaciones de Friedmann-Lemaître. En 1948 desarrolló una versión muy mejorada, principalmente en colaboración con su doctorando Ralph Alpher, al hacer uso de nuevos datos en las tasas de reacción de secciones eficaces de captura de neutrones, datos que no habían sido clasificados hasta entonces. El universo primitivo se describía ahora como un gas de neutrones caliente y altamente comprimido que, de alguna manera, empezó a expandirse desintegrándose en protones y electrones. Algunos de los protones se combinarían con los neutrones que quedaran para formar deuterones y, a partir de estos núcleos, los elementos más pesados se supone que serían sintetizados por capturas de neutrones sucesivas y desintegraciones beta. Ni en esta versión ni en las posteriores, intentó Gamow contestar la pregunta de qué causó la explosión o la desintegración inicial de los neutrinos hace dos mil millones de años. Gamow y Alpher querían evitar preguntas sobre el origen del universo y simplemente dieron por buenas las condiciones iniciales. Consideraban el principio de $t = 0$ como ajeno al reino de la física y, por esta razón, nunca usaron el término «*big bang*» para su teoría.

Posteriormente, en 1948, Gamow y Alpher comprobaron que el universo primigenio, con una temperatura en torno a los 10^9 K, debía de estar dominado por la radiación más que por la materia. Esto afectaba a los detalles de los cálculos y, lo que es más importante, llevó a Alpher y a su colaborador Robert Herman a concluir que los restos fósiles de la radiación primordial enfriada todavía debían de estar entre nosotros. En un artículo breve de 1948, calcularon la temperatura actual de fondo del universo en 5 K. Gamow, Alpher y Herman informaron de la predicción de una radiación cósmica de fondo en siete ocasiones entre 1948 y 1956, pero, a pesar de ser tan conocidos, su resultado no atrajo para nada la atención; curiosamente, la predicción fue ignorada y finalmente olvidada, hasta que fue restaurada a mediados de los años sesenta, en una época en que Gamow y sus dos asociados ya no estaban en activo en la investigación cosmológica. De la misma manera, el modelo de Gamow del universo continuó sien-

do desarrollado y refinado, principalmente por Alpher y Herman, pero también con aportaciones ocasionales de otros físicos nucleares, incluyendo algunos tan notables como Fermi o Wigner. La asunción original de un universo inicial compuesto únicamente de neutrones se convirtió en insostenible, como fue argumentado en primer lugar por el físico japonés Chushiro Hayashi en 1950. De acuerdo con Hayashi, los procesos nucleares distintos de la desintegración del neutrón deberían tomarse en cuenta, lo que le hizo sugerir que el universo más temprano consistía en una mezcla de protones, neutrones y fotones. A partir de esta premisa, Hayashi realizó un cálculo aproximado de la distribución existente entre hidrógeno y helio, con resultados muy concordantes con los datos de observación más bien inciertos que existían en la época. Un modelo aún más refinado fue desarrollado por Alpher, Herman y James Follin en 1953, en un artículo que marcó el cenit de la teoría clásica del *big bang*. Haciendo uso de los avances más recientes de la teoría nuclear y de partículas, los tres físicos realizaron un análisis detallado y exhaustivo del universo temprano, empezando en un tiempo de 10^{-4} segundos después de la explosión inicial, cuando la temperatura era de aproximadamente 10^{12} K. Entre los resultados obtenidos por Alpher, Herman y Follin había la de un porcentaje de peso presente de helio de un 32 por 100 aproximado, una cifra que casaba razonablemente bien con la estimada a partir de los datos espectroscópicos.

A pesar de los avances impresionantes realizados en la teoría del *big bang* entre 1948 y 1953, la teoría fue infructuosa a la hora de atraer interés y fue abandonada *de facto* durante más de una década. ¿Por qué esta teoría, esencialmente correcta, como la vemos ahora, fue desechada hasta mediados de los años sesenta? Una teoría tan grandiosa como la cosmología de Gamow-Alpher naturalmente tuvo que encarar problemas, entre los cuales estaba el de su aparente incapacidad para tener en cuenta la formación de las galaxias y, lo que es más grave, su fracaso en explicar la formación de los elementos más pesados. Para construir elementos más pesados que el helio, tenía que encontrarse algún tipo de puente entre la brecha de los números másicos 5 y 8 (en los que no existe núcleo). El problema era que, a pesar de realizar muchos intentos, no se encontró ninguna solución satisfactoria –esto es, una correspondiente a las condiciones físicas del universo temprano–. El fracaso parecía implicar que las razones originales de la teoría de Gamow, la formación cósmica de elementos, debían ser abandonadas. Por otra parte, el fracaso no llegó a constituir una refutación de la teoría, por lo que era bastante posible asumir que, aunque el helio se produjera de manera cosmológica, los otros elementos fueran los resultados posteriores de reacciones nucleares en el interior de las estrellas. Es difícil evitar la conclusión de que la falta de interés en la teoría del *big bang* de Gamow después de 1953 no fuera en parte la resultante de factores sociológicos no relacionados con las cualidades de la teoría en sí misma. Una de las razones era, indudablemente, que la teoría no tenía una afiliación disciplinar clara, sino que involucraba dos campos de la física que en su momento se veían como claramente diferentes. Era una teoría más física que astronómica pero, al combinar la física nuclear con la relatividad general, iba contra la tendencia de especialización que caracterizó la física estadounidense en los años cincuenta. La barrera de separación entre los

físicos nucleares y los de partículas, tan en boga, y (los que eran considerados como) los polvorientos cosmólogos, implicaba que los programas de investigación multidisciplinar como el de Gamow tenían dificultades en reclutar personas nuevas y traer el interés de las especialidades existentes. Entonces, cuando Gamow se mudó desde la cosmología a la biología molecular y otros temas a mediados de los años cincuenta, y cuando Alpher y Herman al mismo tiempo se trasladaron a carreras científicas en la industria privada, no hubo nadie que ocupara su lugar donde lo dejaron.

La cosmología tradicionalmente ha sido vista como una disciplina a mitad de camino entre la ciencia y la filosofía y, por esta razón, una disciplina que necesitaba de una metodología distinta de la imperante en la investigación física ordinaria. Gamow y su pequeño grupo de cosmólogos no estaban de acuerdo. Siendo físicos de formación y de espíritu, veían el universo temprano como algo que podía ser tratado con los métodos regulares de la física: lo consideraban como un problema difícil, pero no menos como un problema que no difería cualitativamente de otros problemas de la física nuclear. Confiados en que los cálculos avanzados asistidos por ordenador, con entrada de datos de los laboratorios nucleares-físicos, darían la respuesta adecuada, no vieron la necesidad de introducir nuevos principios o debatir el estado conceptual de la cosmología en ninguno de sus aspectos. Abreviando, su actitud era pragmática y empírica. Gamow se vio a sí mismo como un cosmo-ingeniero, y en una ocasión comparó al cosmólogo con el ingeniero que diseña un coche nuevo: mientras que el ingeniero tiene que basarse en las leyes y materiales conocidos, así también debería el cosmólogo buscar modelos del universo que satisficieran las leyes conocidas y estuvieran de acuerdo con los datos experimentales. Ésta era una actitud radicalmente diferente de la dominante en la cosmología, y probablemente contribuyó al distanciamiento del programa de Gamow del tipo de cosmología teórica cultivada en Europa. Por una parte, la aproximación de la cosmología-como-ingeniería de Gamow era perfectamente acorde con el espíritu pragmático que caló en la física estadounidense de la época (véase capítulo 22). Por otra, su programa de investigación carecía del único ingrediente que podría haber atraído el interés de los físicos, a saber, los datos experimentales y la posibilidad de realizar comprobaciones.

El reto del estado estacionario

1948 no fue sólo el año de la teoría del *big bang* de Gamow, sino también el año en que se produjo en Cambridge, Inglaterra, una propuesta de alternativa radical a la evolución cosmológica. Esta teoría, la «nueva cosmología», o teoría del estado estacionario del universo, fue sugerida en dos versiones diferentes, una por Fred Hoyle y la otra por Hermann Bondi y Thomas Gold. Aunque las dos versiones diferían en sus aspectos filosóficos, compartían los mismos cimientos y daban los mismos resultados observacionales. Hoyle, Bondi y Gold tenían en común con Gamow, Alpher y Herman que eran físicos sin formación formal en astronomía. Ésta era prácticamente la única semejanza entre los dos grupos de cosmólogos.

La teoría del estado estacionario fue motivada por una insatisfacción metodológica con las cosmologías evolucionistas basadas en la teoría de la relatividad, especialmente con aquellas que asumen un comienzo o creación del universo. Hoyle hacía notar que la creación no se podía explicar de manera causal y, por tanto, como escribió en su artículo de 1948, estas teorías iban «contra el espíritu de la indagación científica». Aparte de las objeciones basadas en la filosofía, los tres físicos de Cambridge llamaron la atención sobre la llamada dificultad de tiempo-escala, un problema común a la mayoría de teorías relativistas del tipo del *big bang*. De acuerdo con estas teorías, la edad del universo está relacionada con el parámetro Hubble, en el sentido de que la edad es menor que la constante inversa de recesión (el tiempo Hubble) que alrededor de 1950 se pensaba que era de 1,8 mil millones de años, considerablemente menor que los tres mil millones de años que los métodos fiables de datación radiactiva indicaban para la tierra. Esta discrepancia tan vergonzante desapareció más tarde en los años cincuenta con medidas mejoradas del parámetro de Hubble, pero en 1948 era suficientemente real y un problema que la cosmología relativista sólo podía evitar haciendo como si no existiera.

La solución de Hoyle, Bondi y Gold fue la de basar su alternativa en el postulado de que el universo no es sólo espacialmente sino también temporalmente homogéneo, esto es, que parece el mismo en cualquier localización y en cualquier tiempo. Para poder hacer coincidir un universo estacionario e infinitamente antiguo con la recesión de las galaxias, asumieron que la materia elemental (como los átomos de hidrógeno o los neutrones) se crea de modo continuo a través del universo. La creación de la materia tenía que llevarse a cabo a un ritmo extremadamente lento para que el proceso fuera imposible de observar directamente, pero no por ello era menos importante una hipótesis drástica, porque violaba tanto el venerable principio de la conservación de energía como la respetada teoría general de la relatividad. Sumándose a estas asunciones, los cosmólogos del estado estacionario dedujeron que el universo era un espacio euclídeo en expansión exponencial con una constante de densidad media de materia de $\rho = 3H^2/8\pi G$, siendo H la constante de Hubble y G, la constante de gravitación de Newton. Entre las demás deducciones sobrevenidas a partir de la teoría, estaba que la edad media de las galaxias en cualquier región extensa del universo era de un tercio del tiempo de Hubble, o aproximadamente de 600 millones de años. La teoría se mantuvo en esencia sin cambios durante los años cincuenta, exceptuando que el físico británico William McCrea, en 1952, la reinterpretó en su cercana analogía con la teoría general de la relatividad y afirmó que la creación continua de materia no violaba necesariamente la conservación de la energía. La ingeniosa interpretación de McCrea incluía ideas explicativas que más tarde serían redescubiertas en la cosmología relativista, pero que en la época atrajeron poco interés.

Desde su comienzo en 1948, la teoría del estado estacionario se ganó una fiera oposición, no sólo por su naturaleza no convencional, sino también porque Hoyle la usó de manera ideológica en ataques contra la teoría del *big bang* y contra lo que él calificaba de fundamento religioso en la misma. Que había una alianza no sagrada entre la

creencia cristiana y las ideas cosmológicas de la creación del universo pareció confirmado en 1952, cuando el papa Pío XII argumentó que la cosmología moderna del *big bang* estaba en profunda armonía con los dogmas cristianos y que daba gran apoyo a la existencia de un Creador trascendental. Aunque los argumentos religiosos y filosóficos fueron debatidos acaloradamente, sin embargo, el curso y el resultado de la controversia entre las dos teorías cosmológicas no dependían de estos temas. Lo que importaba realmente eran los argumentos de naturaleza científica más convencional, que, fundamentalmente, quería decir pruebas observacionales. La teoría del estado estacionario cosechó victorias menores al proveer mecanismos plausibles de formación de las galaxias y, en concreto, la base de una teoría nuclear de éxito sobre el origen estelar de los elementos más pesados que el helio. Esta importante teoría, un hito en la astrofísica nuclear, fue desarrollada en 1956-1957 por Hoyle en colaboración con Margaret y Geoffrey Burbidge de Inglaterra y el físico nuclear de Caltech William Fowler. La teoría de Burbidge-Burbidge-Hoyle-Fowler trataba de salvar la brecha de la masa 8 que sólo podría producirse en el interior de las estrellas, y, por tanto contradiría los supuestos de la teoría del *big bang* de Gamow. En cualquier caso, aunque la teoría de B^2HF (como era llamada) estaba ampliamente entendida como un argumento para apoyar la teoría del estado estacionario, no descalificó la teoría rival del *big bang*. La victoria que obtuvo Hoyle fue más psicológica que real.

Mientras que las cosmologías evolutivas predecían que la razón de la recesión galáctica era proporcionalmente mayor para las galaxias distantes, según el modelo del estado estacionario la velocidad se incrementaría en proporción directa a la distancia. El diagrama Hubble para galaxias muy distantes debería por tanto ser capaz de discernir entre los dos tipos de modelos. Allan Sandage, en el Observatorio de Mount Wilson, recopiló datos que indicaban una expansión ralentizada de acuerdo con la perspectiva evolucionista y concluyó que los datos contradecían la teoría del estado estacionario. En cualquier caso, los datos no eran lo bastante irrefutables como para constituir una prueba crucial que pudiera ser aceptada por ambos bandos.

La situación general de finales de los años cincuenta se caracterizó por la incapacidad de las distintas pruebas observacionales de elegir una, claramente, entre las dos teorías. Algunas de las pruebas parecían favorecer un tipo de teoría, otros parecían favorecer la otra, pero ninguna de ellas era concluyente. Cuando los medios radioastronómicos fueron aplicados al mismo problema, primero en 1955 por Martin Ryle de la Universidad de Cambridge, la historia al principio parecía repetirse. Ryle observó que la distribución de las fuentes de radio se contradecían intensamente con la teoría del estado estacionario, pero su conclusión fue prematura y fue contestada por radioastrónomos en Australia. Tuvo que llegar 1960 para que nuevas medidas consiguieran el consenso entre los radioastrónomos con relación a que la distribución de las radiogalaxias contradecían de manera clara la teoría del estado estacionario. Esto sin embargo no supuso la caída inmediata de la teoría y, durante algunos años, Hoyle y sus colaboradores intentaron evitar la conclusión, bien fuera reinterpretando los datos, bien inventándose nuevas versiones de la teoría del estado estacionario que concordaran con

los recuentos de fuentes de radio. Desde esa época en adelante, sin embargo, la teoría del estado estacionario no se consideró ya más como una alternativa seria por la mayoría de los astrónomos.

La teoría del estado estacionario no es sólo distinta de la teoría del *big bang* en el sentido convencional de ofrecer una descripción diferente del universo y que produce predicciones diferentes. Las dos teorías diferían también de manera marcada en un sentido filosófico y sociológico. Representaban «estilos» contrastados en cosmología, y desde luego, en la ciencia como tal. Bondi, Gold, Hoyle y sus seguidores negaban que la cosmología fuera simplemente un caso especial de física, y hacían notar la diferencia entre la física terrestre con sus fenómenos repetibles y gobernadas por leyes, y la ciencia del universo. Por causa de la unicidad del concepto de universo, la cosmología no se trató como una ciencia no explicable, sino sólo como una ciencia descriptiva; además de esto, el entendimiento del universo debía estar basado en principios no derivables de la física local, y si éstos conducían a consecuencias contrarias al conocimiento aceptado, los físicos de Cambridge estaban dispuestos a sacrificar la validez absoluta de las leyes de la naturaleza. La teoría del estado estacionario fue un intento de revolucionar la física cósmica, pero el intento fracasó. No es ninguna casualidad que la cosmología de estado estacionario emergiera en Inglaterra y que sólo fuera en este país donde la teoría encontrara un amplio apoyo y provocara un debate serio. En algunos aspectos, el espíritu de la teoría del estado estacionario era una continuación de las teorías apriorísticas de cosmofísica que fueron populares en la física y astronomía británicas en los años treinta y que hemos descrito en el capítulo 15.

La cosmología después de 1960

Aunque el cambio radical abanderado por los teóricos del estado estacionario fracasó, sí que hubo una especia de revolución en la cosmología en los años sesenta, aunque fue una revolución conservadora que se montó a partir de la física establecida y estaba fuertemente enraizada en el pasado. El hablar de un «renacimiento» sería más apropiado que hablar de una «revolución»: el cambio estuvo asociado con, y dependía de, una serie de descubrimientos espectaculares que demostraban la existencia de nuevos objetos y fenómenos de relevancia cosmológica. Estos descubrimientos dependían de nuevo de la rápida evolución de instrumentos y tecnologías tales como métodos de radioondas y microondas, cohetes espaciales y satélites artificiales. Incluso la ciencia celeste de la cosmología estaba profundamente influida por el instrumental y los métodos originados en el contexto de la física militar. Así como los descubrimientos inesperados de los años 1890 forzaron a una nueva descripción del microcosmos, lo mismo hicieron los descubrimientos inesperados de la década de 1960 en el macrocosmos, aunque, en el último caso, era más la culminación de una descripción ya conocida que la aparición de una nueva.

Entre los nuevos descubrimientos estaba el que el cielo está lleno de rayos X, tanto en la forma de fuentes discretas como de radiación difusa de fondo. Este descubri-

miento, realizado en 1962 por el estadounidense Riccardo Giacconi y sus colaboradores, llegó a ser el punto de comienzo de una nueva rama importante de la astronomía. Más importante para la cosmología fue el descubrimiento de objetos cuasiestelares que los astrónomos del Caltech Maarten Schmidt y Jesse Greenstein realizaron a principios de 1963. Encontraron una serie de objetos de tipo estelar que difería de las estrellas normales y de las galaxias por sus espectros inusuales, su intensidad variable, su enorme salida de radioenergía y su fuerte corrimiento al rojo. Es interesante hacer notar que los quásares, como enseguida fueron denominados, habían sido observados en placas fotográficas años antes de descubrirse que eran una forma enteramente novedosa de radioobjetos. A este respecto, el caso puede rememorarnos a otros episodios de la historia de la física, como el de los rayos X y el descubrimiento del positrón (capítulos 3 y 13). Estos casos ilustran el punto obvio de que describir algo no es idéntico a descubrir algo. Los quásares como objetos de estudio entre astrofísicos se pusieron inmediatamente de moda, a la vez que fueron controvertidos. ¿Qué procesos físicos podrían derivarse de su gigantesca producción de energía? ¿Indicaban sus corrimientos al rojo que eran objetos cosmológicos o podían ser explicados de otra manera? Pronto se consensuó que los quásares estaban sin duda a grandes distancias cosmológicas que implicaban que probablemente estaban en contradicción con la teoría del estado estacionario, según la cual no podrían existir objetos tan alejados en la distancia y en el tiempo. Para asentar la cuestión, los astrónomos idearon una prueba cartografiando los corrimientos al rojo de los quásares contra sus densidades de flujo. Los resultados, publicados en 1966, contradecían la distribución predicha por la teoría del estado estacionario. Aunque era posible justificar la contradicción, como hizo Hoyle, la mayoría de los astrónomos y físicos la aceptaron como una refutación genuina de la teoría del estado estacionario.

En la época, la teoría ya había sido sacudida por el descubrimiento aún más importante de la radiación de microondas cósmicas de fondo. Como se mencionaba previamente, ya en 1948, Alpher había predicho tal radiación de cuerpo negro de temperatura 5 K, pero su predicción fue olvidada. Dieciséis años después, el físico de Princeton Robert Dicke llegó de modo independiente a una conclusión similar y sugirió a su colega James Peebles que examinara la cuestión. Peebles estimó que la temperatura presente de radiación hipotética de fondo era de unos 10 K y, en la primavera de 1965, Dicke y Peebles comenzaron una colaboración con físicos experimentales para detectar la radiación. Antes de que hubieran obtenido resultado alguno, tuvieron constancia de unos experimentos realizados por dos físicos en Bell Laboratories, Arno Penzias y Robert Wilson. Los dos físicos de AT&T habían usado un radiómetro para medir señales de la Vía Láctea y, en el transcurso de sus mediciones, se dieron cuenta de que había un exceso sistemático de temperatura de 3,3 K, independientemente de la dirección a la que apuntara la antena. Penzias y Wilson no podían explicarse el exceso de temperatura, pero Dicke y Peebles entendieron de inmediato que lo que habían detectado era de hecho el fondo de microondas del *big bang*. El descubrimiento, pronto confirmado en otras longitudes de onda, fue anunciado en el ejemplar de julio de 1965

de *Astrophysical Journal*. Aquí había un descubrimiento que efectivamente menoscabó la teoría del estado estacionario y dio un soporte sólido a la teoría del *big bang*, que predecía de modo exacto este tipo de radiación. Para la mayoría de físicos y astrónomos, el descubrimiento del fondo de microondas era un experimento crucial, sin duda, la prueba de que el universo había comenzado con una gran explosión o *big bang*. La radiación 3 K –ahora su temperatura se mide en 2,735 K– se sigue considerando como el argumento más impresionante a favor de la teoría del *big bang*. Después del descubrimiento en 1965, se comprendió que la radiación de fondo cósmica era importante en los cálculos de la abundancia del helio, un problema que no podía ser solucionado por las teorías de formación estelar de los elementos. Basándose en los preceptos de la teoría del *big bang* y un fondo de microondas de 3 K, en 1966 Peebles encontró una abundancia de helio del 27 por 100, con una correlación excelente con lo que había sido estimado a partir de las observaciones. Éste fue también otro triunfo de la nueva cosmología del *big bang*.

Penzias y Wilson recibieron en 1978 el premio Nobel por su descubrimiento, a pesar del hecho de que no habían descubierto *de facto* la radiación –esto es, no la habían identificado como de origen cósmico– sino que sólo habían detectado algo que no podían explicar. En el discurso de bienvenida, el presidente del comité Nobel de Física dijo que el descubrimiento había convertido «la cosmología [en] una ciencia, abierta a la verificación y a la observación». El sentimiento de que emergía una cosmología científica o física (opuesta a la matemática) sólo con los eventos de 1963-

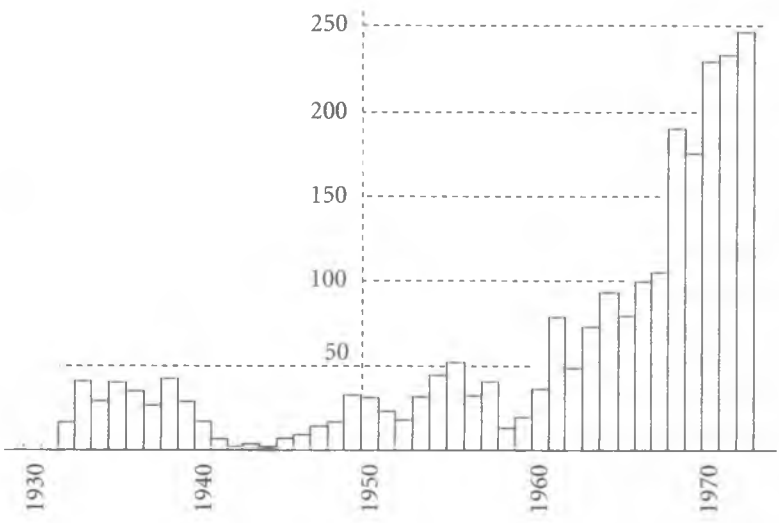


Gráfico 23.1. El crecimiento de la cosmología, como está indicado por el número anual de publicaciones listadas bajo «cosmología» y «cosmogonía» en *Physics Abstracts. Fuente:* reproducido con permiso de M. P. Ryan y L. C. Shepley, «Resource Letter RC-1: Cosmology». *AJP* 44 (1976), pp. 223-230. (©) 1976 American Association of Physics Teachers.

1966 estaba muy generalizado a finales de los años sesenta, y todavía es parte de la historia actual de los cosmólogos. Según esta historia, los sucesos anteriores a 1963 pertenecen a un estadio precientífico, semimítico, gobernado por matemáticas estériles, o ideas supersticiosas, tales como una creación continua de la materia. Aparte de la falsedad obvia de esta interpretación de la historia, es importante recalcar que la descripción del *big bang* no fue un resultado de mediados de los años sesenta, sino que puede encontrarse plenamente desarrollada en los trabajos más tempranos de Gamow y sus colaboradores.

Sin embargo, es cierto que la cosmología experimentó un despegue extraordinario en los años sesenta, tanto científico como social. Como ejemplo, el número anual de artículos científicos sobre cosmología se incrementó entre 1962 y 1972 desde unos 50 a unos 250 (gráfico 23.1). Incluso una producción de 250 artículos es un número pequeño para una subdisciplina científica, en todo caso. La modesta escala de la cosmología se ilustra posteriormente por el hecho de que, en 1972, menos del 0,3 por 100 de todas las publicaciones resumidas en *Physical Abstracts* estaba bajo los epígrafes de «cosmología» o «cosmogonía».

De mayor importancia que el número de publicaciones, con la eliminación del rival del estado estacionario, apareció a mediados de los sesenta un consenso entre los cosmólogos con respecto a los principales problemas que había que resolver y los criterios que debían emplearse. La teoría relativista del *big bang* «caliente» obtuvo un estatus paradigmático, y las interpretaciones alternativas fueron marginadas. Al mismo tiempo que la cosmología se convirtió en cognitivamente institucionalizada, logró una institucionalización social que hizo del tema una ocupación profesional a tiempo completo gozando de una respetabilidad científica en aumento. Existía una integración creciente en los departamentos de las universidades, y no sólo en los departamentos de matemáticas, donde habitualmente se habían llevado a cabo los escasos cursos de los años cincuenta. Desde los años setenta, la cosmología incrementó su docencia en departamentos de astronomía, física y ciencias espaciales, y los estudiantes fueron educados en una tradición de investigación con una herencia compartida. Las diferencias nacionales que habían caracterizado la cosmología más temprana también desaparecieron. Originalmente, la teoría del *big bang* era una teoría estadounidense, la teoría del estado estacionario pertenecía a los británicos y los rusos dudaban si realizar cosmología alguna. Ahora el campo se había hecho verdaderamente internacional, ya no se podía deducir la nacionalidad de un autor a partir de la teoría que defendiera.

La colaboración entre la física nuclear y la cosmología que empezó con Gamow en los años cuarenta se aceleró en los setenta cuando la física de partículas elementales llegó a ser un ingrediente importante en la nueva cosmología. Por ejemplo, los cálculos detallados realizados en 1977 por Gary Steigman, David Schramm y James Gunn en la Universidad de Chicago mostraban que el número de neutrinos diferentes no podía ser más de tres, o posiblemente cuatro, si era correcta la teoría del *big bang* caliente. La predicción fue confirmada más tarde por experimentos en aceleradores de altas energías y sirvió para incrementar la confianza en la corrección básica del modelo del *big bang*.

La contribución más destacable de la física de partículas a la cosmología moderna fue la teoría inflacionaria que el físico estadounidense de 31 años Alan Guth sugirió en 1981. (Una forma de inflación había sido propuesta por el físico ruso Alexei Starobinski en 1979, pero no había conseguido atraer la atención.) Basado en el concepto de «falso vacío», Guth ideó un modelo según el cual el universo muy temprano pasó por un enfriamiento extremo y se expandió de pronto en un factor gigantesco, un incremento de un factor 10^{30} en un periodo de 10^{-30} segundos. Después de la explosión inicial, la expansión se ralentizó de acuerdo con la teoría estándar del *big bang*. En 1982, la teoría de Guth fue mejorada por Andrei Linde en la Unión Soviética e independientemente por Andreas Albrecht y Paul Steinhardt en los Estados Unidos. El nuevo modelo de universo inflacionario explicaba, entre otras cosas, la homogeneidad a gran escala del universo, la ausencia de monopolos magnéticos y la cuasiplanitud del espacio, ninguna de las cuales podía ser explicada por la teoría estándar. Aunque el modelo inflacionario no está libre de problemas, obtuvo gran éxito y causó un cambio significativo en el pensamiento cosmológico. En 1977 se habían publicado más de tres mil artículos sobre la teoría inflacionaria. Continuaremos con algunos aspectos más de la interacción física de partículas-cosmología en el capítulo 27.

El renacimiento de la relatividad general

A mediados de los años veinte, la teoría general de la relatividad de Einstein estaba razonablemente bien confirmada y aceptada por la mayoría de los físicos. Sin embargo, sólo un puñado de físicos y matemáticos trabajaron con la teoría como tema de investigación; la inmensa mayoría enfocó la relatividad general como algo tan experimentalmente vacío como matemáticamente abstruso. Mientras que la teoría especial de la relatividad se usaba cotidianamente en la física atómica y de partículas, la relatividad general parecía no tener apenas conexión con la experimentación y parecía irrelevante a la mayoría de las ramas de la física. En el despertar de la mecánica cuántica relativista-especial de Dirac de 1928, muchos físicos buscaron unificar la mecánica cuántica y la relatividad general, pero ninguno de los intentos fue viable. La teoría general de la relatividad, en todo caso, fue tratada por un pequeño grupo de matemáticos, físicos teóricos y astrónomos, quienes investigaron la estructura matemática de la teoría o derivaron resultados de ella que, sin embargo, no podían ser probados de manera experimental. En los treinta y en los cuarenta, era una teoría decididamente pasada de moda, sobre todo comparada con la teoría cuántica y la física nuclear. La única área de investigación física en la cual la teoría desempeñaba un papel importante era la cosmología, pero la mayoría de los físicos veían los estudios cosmológicos como algo en la periferia de la ciencia, si no fuera de ella.

Lo que se ha llamado el momento de mayor sequía de la relatividad general duró hasta principios de los cincuenta. Desde entonces y hasta ahora, especialmente desde alrededor de 1960, el campo empezó a atraer un nuevo interés y pronto experimentó un renacimiento notable. Los pequeños grupos de jóvenes relativistas empezaron a ali-

nearse junto a teóricos como John Wheeler o Peter Bergmann en los Estados Unidos, Bondi en Inglaterra, Leopold Infeld en Polonia y Vladimir Fock en la Unión Soviética. Una señal del renovado interés fue una serie de conferencias sobre los problemas de la relatividad general y áreas asociadas, siendo la primera la conferencia de Berna de 1955 que celebraba el 50 aniversario de la teoría de Einstein; fue seguida de la conferencia de Chapel Hill en los Estados Unidos (1957), una conferencia en Royamont, Francia (1959), y otra en Varsovia (1962). Los temas tratados en las primeras conferencias eran de naturaleza teórica y matemática o se referían, en unos pocos casos, a observaciones astronómicas. En 1970, la publicación de una revista llamada *General Relativity and Gravitation* comenzó bajo los auspicios del International Committee on General Relativity and Gravitation (Comité Internacional sobre Relatividad General y Gravitación), fundado en 1960 como resultado de la reunión de Royamont. En el primer número de la revista, el editor André Mercier llamó la atención sobre «la extraordinaria y muy satisfactoria combinación de astrofísicos y RGG [Relatividad general y gravitación] que había aparecido en los últimos años». Sobre esta combinación escribió: «La RGG ha salvado a la cosmología del "demasiado hipotético", y la astrofísica combinada con la física de partículas ha convertido las teorías RGG en algo sólido, mientras que en cambio, durante una o dos décadas han sido despreciadas por tantos físicos bajo el pretexto de que no eran físicas». En los departamentos de física, los cursos sobre relatividad general se multiplicaron y se escribieron nuevos libros de texto. La publicación en 1973 de *Gravitation*, un libro de texto enorme (de 1.280 páginas), escrito por Charles Misner, Kip Thorne y Wheeler, era otra señal de que la relatividad general había cambiado y se había trasladado a la física mayoritaria.

Existían básicamente cuatro razones por los cuales el estatus y el interés en la relatividad cambiaron tan drásticamente en los años sesenta. Primero, el rechazo de la teoría del estado estacionario fue interpretado extensamente como un triunfo de la relatividad general. En segundo lugar, los nuevos descubrimientos en la astronomía reproducían la aplicación de la relatividad a los problemas astrofísicos. En tercer lugar, la teoría de Einstein fue desafiada por una nueva y controvertida teoría de la gravitación. En cuarto y más importante lugar, los nuevos métodos de la física experimental convirtieron la teoría general de la relatividad en una ciencia de laboratorio. «La teoría de la gravitación de Einstein, su teoría general de la relatividad de 1915, se muda del reino de las matemáticas al de la física», concluyó el físico teórico estadounidense Alfred Schild en 1960. «Después de 40 años de una precaria escasez de comprobaciones astronómicas, se hace posible realizar y planificar nuevos experimentos terrestres» (Kragh 1996b, p. 318).

Uno de los experimentos pioneros referidos por Schild fue realizado en los primeros años sesenta por Robert Pound y Glen Rebka de la Universidad de Harvard, midiendo el «peso aparente de fotones» como se tituló su artículo, o expresado de otra manera, el corrimiento al rojo *(redshift)* gravitatorio. Esta predicción de la relatividad general había sido confirmada por mediciones astronómicas a principios de los años veinte, pero con poca exactitud y de una forma no muy aclaratoria. Para poder medir el desplazamiento en la frecuencia causado por la variación del campo gravitatorio de

la tierra sobre apenas veinte metros (la altura del edificio del laboratorio de Harvard), Pound y Rebka hicieron un uso sofisticado de un nuevo método de estrechamiento de la forma de las líneas espectrales, produciendo así un rayo gamma con una frecuencia extremadamente bien definida. El método estaba basado en el efecto Mössbauer, denominado así por el físico alemán Rudolf Mössbauer, que lo había descubierto en 1958. El efecto Mössbauer tuvo aplicaciones en campos diversos, desde la química nuclear hasta la relatividad general, y a su joven descubridor le fue concedido el premio Nobel de 1961 por su trabajo.

El experimento de Pound-Rebka confirmó la predicción relativista con una tolerancia del 10 por 100 y, en un experimento mejorado de 1965, la coincidencia se estrechó hasta el 1 por 100. La importancia del experimento de Pound-Rebka no era sólo que apoyaba la teoría de Einstein, sino que también marcó el preludio de una nueva era de la relatividad experimental. El resultado combinado de los experimentos en los años setenta, haciendo uso de relojes atómicos, cohetes, satélites, ordenadores y otros instrumentos electrónicos avanzados, fue una confirmación completa de la teoría de la relatividad. A finales del siglo XX, la relatividad general empírica se había convertido en gran ciencia.

Los aspectos teóricos de la relatividad general fueron estudiados por John Wheeler, Bryce DeWitt y Roger Penrose, por mencionar unos pocos. En 1960, Penrose, un matemático británico, presentó nuevas y potentes herramientas topológicas en la teoría y, en 1965, demostró que una estrella en colapso gravitatorio inevitablemente terminará como una singularidad espacio-temporal.

Los descubrimientos astronómicos de los sesenta y setenta resultaron ser otra fuente importante para el renacimiento de la relatividad general (véase tabla 23.1). El descubrimiento de los quásares en 1963 y el descubrimiento casual de los púlsares cuatro años después por Jocelyn Bell y Anthony Hewish en la Universidad de Cambridge resultaron inmediatamente en intentos de entender los dos fenómenos reseñados de modo teórico. Se vio que las explicaciones sólo eran posibles haciendo uso de la teoría de le relatividad

TABLA 23.1
Descubrimientos astrofísicos importantes, 1962-1979

Fenómeno	*Año*	*Descubridores*
Rayos X estelares	1962	Bruno Rossi, Ricardo Giacconi (EEUU)
Quásares	1963	Maarten Schmidt, Jesse Greenstein (EEUU)
Máseres cósmicos	1965	Harold Weaver, S. Weinreb, A. Barrett (EEUU)
Fondo de microondas	1965	Arno Penzias, Robert Wilson (EEUU)
Estrellas infrarrojas	1965	Gerry Neugebauer, Robert Leighton (EEUU)
Púlsares	1967	Jocelyn Bell, Anthony Hewish (RU)
Fuentes superlumínicas	1971	Irvin Shapiro (RU)
Púlsares binarios	1974	Russell Hulse, Joseph Taylor (EEUU)
Lente gravitatoria	1979	Dennis Walsh (RU)

general. De acuerdo con una sugerencia realizada primero por Thomas Gold en la Universidad de Cornell, los púlsares se explicarían como estrellas de neutrones rotando con velocidad y regularidad extremas. Las estrellas de neutrones, que surgen a partir del colapso gravitacional de estrellas enormes, habían sido debatidas teóricamente por Oppenheimer y Hartland Snyder en 1939, pero tuvieron que pasar dos décadas hasta que el tema atrajera una atención generalizada. En 1967, Wheeler acuñó el término de «agujero negro» para una masa esférica colapsada en la singularidad, y en 1974 fue dado a conocer el posible descubrimiento de un agujero negro en la fuente de rayos X Cygnus X-1. Aunque los agujeros negros en general se asume que existen en abundancia, todavía no ha habido ninguna confirmación inequívoca de estos destacables objetos cósmicos.

Todavía otro descubrimiento inesperado en astrofísica habría de ser realizado en 1974, cuando Joseph Taylor y Russell Hulse detectaron señales radioastronómicas que interpretaron como emitidas por un pulsar binario –esto es, un púlsar en órbita alrededor de un compañero invisible, quizá otro púlsar–. El hallazgo de Taylor y Hulse era más que simplemente otro descubrimiento cósmico: causó gran emoción entre los relativistas, que comprendieron que los púlsares binarios eran ideales como objetos de prueba para la teoría de la relatividad general: la teoría concordaba perfectamente con las observaciones; de modo aun más importante, en 1978 Taylor mostró que los datos del púlsar binario sugerían de modo intenso que la emisión de radiación gravitacional tenía una tasa que coincidía con lo predicho por la relatividad general. El que esos gigantescos cuerpos acelerados emitieran radiación gravitatoria fue argumentado primero por Einstein en 1916, pero la sugerencia se mantuvo como una especie de especulación teórica hasta la demostración de Taylor. En 1993, Taylor y Hulse recibieron el premio Nobel «por el descubrimiento de un nuevo tipo de púlsar, un descubrimiento que ha abierto la puerta a nuevas posibilidades de estudio de la gravitación». A propósito, ésta fue la primera vez que un premio Nobel estaba motivado en parte por la referencia a la física gravitacional. Incluso antes del descubrimiento de Taylor-Hulse, las ondas gravitacionales se buscaban experimentalmente, de modo notable en una serie de experimentos conducidos por Joseph Weber en la Universidad de Maryland. Weber pensaba que las señales recibidas en su detector indicaban la recepción de ondas gravitacionales y anunció el descubrimiento de las ondas en 1969. Sin embargo, su proclamación fue discutida y la mayoría de los físicos concluyó que Weber no había descubierto la radiación gravitacional. Weber no estaba de acuerdo y continuó sus experimentos. Aun en 1998 las ondas gravitatorias no habían sido observadas directamente, y por su implicación, tampoco lo ha hecho el gravitón, la versión cuantizada de las ondas gravitatorias.

A la teoría general de Einstein nunca se han faltado rivales en forma de teorías alternativas de la gravitación. Por mencionar unas pocas, Dirac y Jordan buscaron sin éxito desarrollar teorías con una constante gravitatoria variable en el tiempo, y en 1964, Hoyle y Jayant Narlikar propusieron una teoría no einsteiniana basada en interacciones directas entre partículas. El reto más serio a la relatividad general en los años sesenta fue quizá una teoría desarrollada por Carl Brans y Robert Dicke en la Univer-

sidad de Princeton en 1961. La teoría de Brans-Dicke fue mucho más debatida alrededor de 1970, cuando fue evidente que daba lugar a un número de predicciones geofísicas y astrofísicas diferentes a las de la relatividad general. Por ejemplo, las teorías de Brans y Dicke predijeron una precesión del perihelio de Mercurio menor que los 43 segundos de arco que predecía la relatividad general. Dicke argumentó, a partir de las observaciones solares, que parte del valor observado y, por tanto, la concordancia con la relatividad general, era debido a que el sol estaba más achatado de lo que se creía. La extensión del achatamiento solar continuó siendo un tema de debate durante una década, pero a mediados de los años ochenta estaba claro que la teoría Brans-Dicke no encajaba con los experimentos, mientras que la relatividad general sí lo hacía.

La combinación de experimentos de laboratorio, observaciones astronómicas y avances en los cimientos matemáticos de la relatividad general hicieron posible un nuevo y emocionante subcampo, la astrofísica relativista. El campo fue presentado en el primer Texas Symposium on Relativistic Astrophysics en 1963, la primera de una serie importante de conferencias que fue la contraparte relativista a la serie de conferencias de Rochester de los físicos de partículas. El tema del primer simposio de Texas fue el colapso gravitatorio y los nuevos quásares. Era una reunión verdaderamente interdisciplinar, incluyendo entre sus participantes a físicos nucleares, teóricos relativistas, cosmólogos y astrónomos. Fred Hoyle, William Fowler, Kip Thorne, Allan Sandage, Edwin Salpeter, Roy Kerr y Marteen Schmidt presentaron artículos. Mientras que el simposio de 1963 incluyó unos 300 participantes, más de 800 físicos y astrónomos tomaron parte en el noveno simposio de 1978. Los múltiples simposios y escuelas de verano sobre astrofísica relativista fueron seguidos por libros de texto y volúmenes de actas finales. Entre los primeros y más completos libros en el nuevo campo estaba *Relativistic Astrophysics* (1971) de Yakov Zel'dovich e Igor Novikov, dos eminentes físicos soviéticos. El renovado interés en la física gravitatoria y en la física relativista fue reflejado posteriormente en los venerables congresos de Solvay. El undécimo congreso de 1958 trataba de «Astrofísica, gravitación y la estructura del Universo» e incluía discursos de Hoyle, Lemaître, O. Klein, Wheeler y otros. Seis años después, el XIII congreso se dedicó a «La estructura y evolución de las galaxias» y el tema del XVI congreso en 1973 fue «Astrofísica y gravitación». Los temas tratados durante la conferencia de 1973 incluían las fuentes de rayos X, las estrellas de neutrones, los quásares, los púlsares y los agujeros negros.

CAPÍTULO 24

Elementos de la física del estado sólido

El estado sólido antes de 1940

Alrededor de 1930, muchos físicos estaban ocupados en investigar las propiedades de los cuerpos sólidos. Pero a pesar de la considerable actividad en estas áreas de investigación –muchas de ellas con raíces en el siglo XIX– no existía ninguna disciplina de física del estado sólido en sus aspectos social, institucional ni cognitivo. Desde un punto de vista sociológico e histórico, la física del estado sólido no existía. Tuvo que pasar la Segunda Guerra Mundial para que la nueva ciencia de los cuerpos sólidos, más tarde con el nuevo nombre de física de la materia condensada, despegara y absorbiera varias especialidades que hasta entonces no se pensaba que pertenecieran de manera natural a la misma área científica. El volumen de 1930 de *Physics Abstracts* (entonces todavía llamado *Science Abstracts*, sección A) no incluía ninguna entrada entre sus materias de física del estado sólido o términos relacionados. Las principales materias de estudio eran Física general, Luz (que incluía radiactividad), Calor, Sonido, Electricidad y Magnetismo y Física Química. Cada uno de estos grupos incluía artículos que una generación posterior reconocería como pertenecientes al campo de la investigación del estado sólido. Diez años después, en 1940, el índice de materias de *Physics Abstracts* incluyó una entrada de Sólidos que estaba dividida en las categorías de Estructura y Teoría. La entrada de Teoría del Estado Sólido se dividía en Sólidos, Teoría; Cristales, Dinámica de Redes cristalinas; y Teoría cuántica. A partir de entonces, se puede empezar a hablar de la física del estado sólido como una disciplina separada, cuyos practicantes estaban en el proceso de formación de una comunidad científica.

El núcleo científico de la nueva disciplina, el marco teórico que le daba la coherencia cognitiva necesaria, fue una aplicación de la mecánica cuántica al estado sólido de la materia. Antes de los mecánicos cuánticos, los físicos (junto con los químicos, los cristalógrafos y metalúrgicos) habían estudiado las propiedades mecánicas, ópticas, magnéticas, eléctricas y cristalinas de los sólidos, pero no había ningún denominador

teórico común a estos estudios, que consecuentemente parecían estar sólo conectados de una manera ligera, si es que estaban conectados en algo. Ya en 1930 era común incluir grandes partes de física química, incluyendo debates sobre espectros moleculares y reacciones químicas, en libros y artículos dedicados a la física de materia condensada. Uno de los primeros artículos de revisión que incluyó «sólidos» en su título fue escrito en 1937 y apareció en el *Journal of Applied Physics*. Los autores, Frederick Seitz y Ralph Johnson, escribieron: «hasta ahora, las diversas teorías de diferentes sólidos carecían visiblemente de unidad. Para interpretar las propiedades distintivas de los tres sólidos cobre, diamante y roca salina, por ejemplo, uno tenía que empezar con tres descripciones muy distintas de su constitución interna». Ahora la situación había cambiado y una teoría unificada del estado sólido basada en la mecánica cuántica era una posibilidad realista. Como escribieron los autores, «la teoría cuántica ha tenido éxito en interpretar muchas de las propiedades observadas de los sólidos que las descripciones clásicas dejaban sin explicar» (Weart 1992, p. 628). Tres años después, Seitz escribió uno de los primeros manuales de la nueva física del estado sólido, apropiadamente titulado *Teoría moderna de los sólidos* (*Modern Theory of Solids*).

Entre las numerosas especialidades que construyeron la protofísica del estado sólido de los años treinta, la teoría de los metales fue una de las más importantes. Las primeras teorías de Drude, Riecke, Lorentz y Bohr, todas basadas en el modelo de gas de electrones libres, dieron lugar a resultados razonablemente buenos en algunas áreas, como en la relación entre la conductividad térmica y eléctrica. Sin embargo, no daban la adecuada temperatura de dependencia de resistencia de los metales puros, ni tampoco las antiguas teorías tuvieron éxito en la explicación de las propiedades magnéticas de los metales. De acuerdo con la teoría clásica, se suponía que los calores específicos de los metales eran mucho mayores que aquellos de los aislantes, aunque los experimentos probaron que no era el caso. Era evidente que se necesitaba alguna idea nueva, y que la nueva idea debería venir de la mano de la mecánica cuántica.

El primer físico que aplicó la nueva mecánica cuántica al estudio de los metales fue Pauli, que en 1926-1927 vio que los electrones libres en un metal debían obedecer las estadísticas de Fermi-Dirac. Cuando por primera vez Fermi –y después, de modo independiente, Dirac– presentaron las nuevas estadísticas en 1926, no estaba nada claro si era esta forma de estadísticas o la estadística alternativa de Bose-Einstein la que correspondía a la materia. Por ejemplo, tanto Fermi como Dirac creyeron originalmente que las moléculas de gas obedecían a las mismas estadísticas que los electrones –esto es, que eran fermiones–. (Los nombres «fermión» y «bosón» fueron acuñados por Dirac en 1945.) La cuestión sólo fue aclarada con el trabajo de Pauli. Sobre la base del principio de exclusión y las estadísticas relacionadas de Fermi-Dirac, desarrolló una teoría importante del paramagnetismo, que en muchos de sus aspectos se convirtió en el punto de arranque para todas las teorías cuánticas de metales posteriores. Es irónico que el trabajo de Pauli obtuviera este estatus, ya que Pauli no estaba particularmente interesado en la teoría del estado sólido y consideraba que el campo era mucho menos «puro» que la emocionante física fundamental de la teoría cuántica de campos. En los

primeros años treinta, Pauli a veces se refiere a la física del estado sólido como «física sucia». En una carta del 1 de julio de 1931, escribió a Peierls, que acababa de calcular la resistencia residual en metales, «la resistencia residual es un efecto sucio y uno no debería revolcarse en la mugre». Al mismo tiempo, Pauli desempeñó un papel importante en la fase temprana de la teoría del estado sólido y parece que no tuvo problemas en hacer física «fundamental» y «sucia» al mismo tiempo. Ni tampoco Heisenberg, Bethe, Peierls, Bloch, Mott, Frenkel ni Landau. No eran físicos del estado sólido, sino físicos con un interés en el estado sólido como una de las diversas áreas de aplicación de la mecánica cuántica.

El trabajo de Pauli fue continuado por el trabajo de su antiguo profesor, Arnold Sommerfeld, quien, ese mismo año, hizo uso de la estadística de Fermi-Dirac para mostrar una teoría muy mejorada de la conducción eléctrica en metales. Sommerfeld mostró que el gas de electrones debe degenerar completamente y que sólo una pequeña fracción de los electrones puede contribuir por tanto al calor específico del metal. De este modo, el calor específico relativamente bajo tenía una explicación cualitativa. Los trabajos de Pauli y Sommerfeld abrieron un nuevo capítulo en la historia de la física del estado sólido, pero eran sólo el principio, y aunque empezaron a construir la estadística cuántica y el espín de los electrones no emplearon todo el instrumental de la mecánica cuántica. Aunque la teoría de Sommerfeld era un avance notable, su grado de concordancia con las observaciones distaba de ser perfecto; sin embargo, la teoría imperfecta estimuló muchas críticas y refinamiento y formó el núcleo de un programa de investigación entero. Por ejemplo, en 1928, el *Zeitschrift für Physik* contenía 14 artículos directamente relacionados con la teoría de los electrones de Sommerfeld. Pronto se vio que el principal problema de la teoría de Sommerfeld no era su falta de coincidencia con algunos datos experimentales, sino más bien que funcionaba bien después de todo.

Una teoría verdaderamente mecánico-cuántica de metales fue desarrollada durante los cuatro años siguientes, primero por jóvenes físicos asociados con Pauli, Sommerfeld y Heisenberg. La fase pionera de este desarrollo tuvo lugar en Múnich, Zurich y Leipzig, pero poco después fueron llegando importantes contribuciones desde Inglaterra, Francia, la Unión Soviética, y también de los Estados Unidos. A finales de los años veinte, la estructura matemática y conceptual de la mecánica cuántica fue prácticamente culminada y se animaba cada vez más a los estudiantes de física a que aplicaran la teoría a nuevas áreas, entre las cuales la de los sólidos se veía como particularmente prometedora. Uno de los estudiantes era Felix Bloch, que trabajaba para Heisenberg en Leipzig. Como parte de su tesis doctoral, en 1928 Bloch comenzó una investigación mecánico-cuántica de las funciones ondulatorias de electrones en la red cristalina. Conceptos importantes, como el «teorema de Bloch» y los «estados de Bloch» datan de esta época. Dándole vueltas a ideas de la nueva química cuántica, debida a Hund, London y Heitler, Bloch examinó el comportamiento de los electrones, no en forma de átomos o de moléculas individuales, sino en la forma de campos eléctricos solapados de los numerosos átomos que constituyen un cristal. Dio por supuesto un potencial en el cual los electrones están estrechamente unidos a la red cristalina. Entonces resultaba que los es-

tados energéticos no eran discretos, sino bandas continuas de energías permitidas. El trabajo de Bloch y los casi simultáneos trabajos de Peierls y Bethe allanaron el camino de la teoría de bandas, posiblemente la parte más importante de la teoría del estado sólido: se derivó de la temprana teoría de bandas que la alta conductividad no es meramente lo relacionado con un alto grado de movilidad de electrones. Los electrones necesitan encontrar estados libres en las bandas de energía; si tales estados no existen, el cristal será un aislante. A lo largo de esta línea de pensamiento, Bloch explicó con éxito, por vez primera, la diferencia entre metales y aislantes.

En 1929, a partir de la sugerencia de Heisenberg, Peierls investigó el anómalo o «positivo» efecto Hall, en el cual una corriente en algunos metales es influida por el campo magnético como si los conductores mensajeros estuvieran cargados positivamente. En relación con este trabajo, se percibió que un electrón cerca del borde de banda se comportaría de un modo peculiar, en otras palabras, se movería como si tuviera carga positiva. Esto era la base de la idea del «agujero» –o electrón defectuoso, como lo llamaba Peierls– como un hueco libre cerca de la parte superior de una banda de otro modo llena. Tal agujero, como mostró explícitamente Heisenberg en 1931, se comportaría como un electrón de carga positiva, y con una masa positiva efectiva. (El agujero de estado sólido de Peierls y Heisenberg compartía similitudes con el agujero antielectrón de Dirac dado a conocer al mismo tiempo, pero ambas ideas eran independientes.) Otro concepto de estado sólido importante fue presentado por el físico parisino Léon Brillouin, quien en 1930 desarrolló las ideas de Peierls en la técnica geométrica que, desde entonces, se conoce como zonas de Brillouin. Después comentó, «al principio no me di cuenta de que estaba haciendo algo que podría convertirse en muy importante. Lo hice por divertirme, siguiendo mi propia línea de investigación por pura curiosidad» (Hoddeson, Baym y Eckert 1992, p. 119). La teoría de bandas fue desarrollada ulteriormente por Alan Wilson, un físico de Cambridge que fue a Leipzig a trabajar con Heisenberg y Bloch en parte porque consideraba que la física de Cambridge estaba demasiado preocupada por el núcleo atómico. En 1931, Wilson publicó sus artículos pioneros sobre semiconductores, en los cuales por primera vez describió un semiconductor como un aislante con un hueco de banda, a través del cual los electrones pueden pasar como resultado de una excitación. El modelo de Wilson estaba en una etapa dentro del camino hacia unos cálculos más realistas en el estado sólido y por tanto hacia una mayor unidad entre teoría y experimentación. La tendencia continuó a través de los años treinta e incluyó como elemento importante la aplicación de la teoría de bandas al sodio y a otros metales reales. La primera aplicación de este tipo fue realizada en 1933 por Wigner y su estudiante Frederick Seitz en el nuevo Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (fundado en 1932). Los cálculos de Wigner-Seitz fueron desarrollados más adelante por John Slater y sus estudiantes en el MIT.

La fase temprana de la teoría de electrones mecánico-cuántica de metales se completó en 1933, cuando todo el campo fue revisado por Bethe en el *Handbuch der Physik*. El artículo, de casi 300 páginas, apareció bajo los nombres de Sommerfeld y Bethe, pero estaba escrito casi en su totalidad por Bethe, el autor júnior. Otros artículos del

mismo volumen trataban sobre «teoría de dinámica de redes» y «propiedades de cristales estructuralmente sensibles» e indicaban que la física del estado sólido estaba encaminada a formar una subdisciplina científica diferenciada. La nueva subdisciplina era alemana de nacimiento, pero se extendió rápidamente a otros países. En los Estados Unidos, los primeros centros de física de estado sólido fueron el departamento de física de Slater en el MIT y el de la Universidad de Princeton, donde Wigner daba charlas y supervisaban Seitz y John Bardeen. La institución de mayor éxito de las orientadas al nuevo estado sólido era quizá la Universidad de Bristol, que hasta los años treinta no había sido uno de los centros de física más importantes de Inglaterra. En 1930 el Departamento de la Investigación Científica e Industrial (en inglés DSIR, Department for Scientific and Industrial Research) aprobó un programa sobre física del estado sólido en la universidad, una iniciativa que, como solía ocurrir, estaba más apoyada por círculos industriales y gubernamentales que por la propia universidad. En 1932, Nevill Mott, un físico nuclear sin contribuciones previas a la física del estado sólido, llegó a ser profesor en Bristol. Aunque su profesada ignorancia de la teoría del metal era «profunda», enseguida transformó el departamento de física en un centro mundial de la investigación en estado sólido. Mott dijo después que «estaba fascinado de aprender que la mecánica cuántica se podía aplicar a problemas de tal importancia práctica como las aleaciones de metales y esto fue, más que ninguna otra cosa, lo que desvió mi interés a los problemas de los electrones en los sólidos» (Eckert y Schubert 1990, p. 91). En Bristol, como en cualquier otro lugar, la importancia práctica de la física del estado sólido le dio a ésta una gran prioridad y fue un motivo importante para su apoyo económico, aunque fue la física académica, y no la física de ingeniería, lo que interesó a Mott y a sus colegas. La *Teoría de las propiedades de metales y aleaciones*, escrita por Mott y Harry Jones en 1936, usó cálculos mecánico-cuánticos cuantitativos adaptados a metales reales y mezclaba a voluntad consideraciones empíricas con métodos de aproximación. Aunque era «física sucia» según la escala de valores de Pauli, el libro llegó a ser un trabajo de referencia para una nueva generación de físicos de metales. El grupo de Bristol disfrutaba de estrechos contactos con sus colegas en los Estados Unidos, tanto del mundo académico como del mundo comercial, y en Inglaterra el grupo colaboraba con el Laboratorio Nacional de Física y con la industria privada. Los estrechos vínculos entre la industria y la física del estado sólido fueron muy importantes después de la Segunda Guerra Mundial, pero, incluso antes de la guerra, tales nexos estaban ya bien establecidos en países como Inglaterra, Alemania, los Países Bajos y no menos en los Estados Unidos.

Semiconductores y el auge de la comunidad del estado sólido

Hay sustancias que no pertenecen ni al típico estado metálico ni al típico estado no metálico. Tales semiconductores, tanto elementos químicos como compuestos, se conocen desde mediados del siglo XIX. Ya en 1833, Michael Faraday había observado que la resistividad del sulfito de plata decrece al aumentar la temperatura, un comportamien-

to contrario al de los metales. Posteriormente en el mismo siglo XIX, se descubrieron las fotocorrientes en el selenio, y en 1874 el físico alemán Ferdinand Braun observó que los contactos entre algunos materiales tenían el efecto de rectificar la corriente. El término «semiconductor» (el alemán *Halbleiter*) parece hacer sido acuñado en 1911. En los años treinta, la mayoría de estas y otras propiedades semiconductoras estaban razonablemente explicadas por la teoría de bandas de Wilson al ser desarrollada por un número creciente de físicos del estado sólido. Se entendía que los semiconductores eran aislantes con una pequeña banda prohibida entre la banda de valencia y la banda conductora. Al mismo tiempo, los semiconductores fueron estudiados de forma semiexperimental, no menos en Gotinga, donde Robert Pohl estableció una importante escuela en la física del estado sólido experimental. A finales de los años treinta, se sabía que el efecto de rectificación era un efecto conjunto, que se daba en la interfaz entre el metal y el semiconductor, y que los semiconductores eran de dos tipos, el tipo *p* y el tipo *n*. Estos dos nombres, ahora familiares, fueron introducidos en 1941 por Jack Scaff de Bell Laboratories par reponer los nombres previamente usados de tipos de defecto y de exceso. En los semiconductores de tipo exceso o *n*, la mayoría de los transportadores de carga son negativos, mientras que son positivos en el caso de los semiconductores de tipo *p* o defecto. Aunque existían varias teorías para la rectificación en ambos tipos de intersecciones (metal a semiconductor tanto de tipos *p* o *n*), era difícil encontrar una explicación satisfactoria. Una teoría de mucho éxito de contactos rectificados fue desarrollada sobre 1940, primariamente por Walter Schottky en Alemania, Mott en Inglaterra y B. I. Davydov en Rusia. La física de semiconductores fue una parte muy pequeña de la física del periodo. En 1933 se publicaron unos 60 artículos en la materia y, durante los años siguientes, el número de artículos decreció de manera sostenida hasta alcanzar un punto mínimo de 20 en 1940.

La guerra significó un gran incremento en la investigación de los semiconductores, en particular porque el silicio y el germanio puros eran de importancia crucial como detectores de radar. Fue en el curso de trabajos relacionados con la guerra cuando se investigó la primera unión *p-n*, que demostró ser un excelente rectificador. Este tipo de rectificador ya había sido sugerido por Davydov en 1938, pero su sugerencia atrajo poca atención en su momento. El acontecimiento más importante en la historia de la investigación en semiconductores fue, indudablemente, la invención del transistor a finales de 1947. La idea de extender la analogía entre un semiconductor y un diodo de vacío a uno incluyendo un triodo era bien conocida, y un triodo en funcionamiento de estado sólido ya había sido construido antes de la guerra por Pohl y Rudolf Hilsch en Gotinga. Como resultado de las pesquisas de la compañía electrotécnica de gran volumen AEG (Allgemeine Elecktricitäts-Gesellschaft), en 1938 los dos físicos desarrollaron experimentos con corrientes eléctricas controladas por cristales. Su aparato usaba un cristal de bromuro de potasio y amplificaba la corriente en más de cien veces. Era práctico y, sin embargo, no fue patentado ni desarrollado con posterioridad. Aunque Pohl tenía buenos contactos en la industria, no estaba interesado en reenfocar su carrera en innovaciones tecnológicas o en conseguir patentes.

Ernest Braun, un físico el estado sólido e historiador de la ciencia, ha resumido el desarrollo de la física de semiconductores del siguiente modo: «La historia de la física de semiconductores no es una de grandes teorías heroicas, sino una de labor inteligente y concienzuda. No son golpes de genio produciendo edificios majestuosos, sino una gran inventiva y un constante vaivén entre la esperanza y la desesperación. No eran generalizaciones barredoras, sino juicios cuidadosos en la línea divisoria entre la perseverancia y la obstinación. Por tanto la historia de la física del estado sólido en general y de los semiconductores en particular, no es tanto sobre grandes hombres y mujeres y sus grandes gestas, sino sobre los héroes no reconocidos de miles de ideas astutas y de experimentos habilidosos, el avance de un obstinado ciempiés más que el de un lustroso pura sangre, y por tanto un reflejo de una era de la organización más que de la individualidad» (Braun 1992, p. 474). Pero a pesar del desarrollo generalmente poco romántico de la física de semiconductores, al campo no le faltaban grandes hombres o gloriosas acciones. La invención del transistor podría denominarse una gesta gloriosa.

El transistor fue la criatura de Bell Laboratories, que en 1945 estableció un programa de investigación sobre física del estado sólido que incluía un subgrupo en física de semiconductores dirigido por William Shockley, un físico del MIT que había trabajado con AT&T desde 1936. El objetivo a largo plazo de Shockley y Walter Brattain, un experimentalista de Bell, era construir un amplificador de estado sólido que pudiera ser utilizado, entre otras cosas, como un interruptor de cambio de sistemas telefónicos. En cualquier caso, no era un programa de desarrollo y el objetivo primario de Shockley y Brattain y otros colegas era simplemente ampliar el conocimiento científico de las propiedades del silicio y del germanio. Al principio, sus intentos fallaron, pero en 1947 John Bardeen, que había llegado a Bell Laboratories dos años antes, analizó teóricamente los problemas de los experimentos. Bardeen concluyó que los estados energéticos en la superficie del semiconductor tenían que ser tomados en cuenta, porque los electrones podrían haberse quedado atrapados en la superficie. La teoría de los estados de energía de superficie había sido sugerida previamente para la superficie libre de un sólido, pero no para semiconductores. Según Bardeen, «el rasgo novedoso no era la idea de los estados de superficie [...] sino aplicar la idea para entender la superficie real de un semiconductor» (Braun 1992, p. 468). Después de la explicación posterior, un gran avance experimental siguió al gran avance teórico. El 23 de diciembre de 1947, Bardeen y Brattain observaron el efecto transistor en el primer transistor de punto de contacto, que consistía en dos electrodos metálicos y puntiagudos conectados a un cristal de germanio. El nombre «transistor» se usó como forma abreviada de *transfer resistor* o resistencia de transferencia. Después de un periodo de secretismo de medio año, el amplificador de estado sólido o triodo de cristal, como se llamó al invento, fue dado a conocer en una conferencia de prensa y se informó de él, sin fanfarria, en el *New York Times* del 1 de julio de 1948. En cualquier caso, aunque era una invención de gran alcance, el transistor de punto de contacto tenía los días contados y de hecho quedó obsoleto tan pronto como fue producido. Fue rápidamente sustituido por el transistor de unión *p-n* basado en una teoría que Shockley desarrolló en 1948, pero la cual

la *Physical Review* rechazó publicar porque pensaron que carecía de base teórica. Fue este trabajo el que hizo a Shockley compartir el premio Nobel de 1956 con Brattain y Bardeen por «sus investigaciones sobre semiconductores y su descubrimiento del efecto transistor», y fue este trabajo, incluido en el libro de Shockley de 1950 *Electrons and Holes in Semiconductors (Electrones y agujeros en semiconductores)*, el que cimentó la electrónica del estado sólido moderna.

La celebrada invención del transistor fue uno de los acontecimientos que hicieron que la física de semiconductores, y la física del estado sólido en general, floreciera en los años cincuenta. El crecimiento explosivo se ilustra por las publicaciones sobre física de semiconductores: entre 1948 y 1955, el número de artículos por año se incrementó de 20 a casi 400. La década de los cincuenta fue la época en que la física del estado sólido realmente se convirtió en una disciplina científica independiente y en una comunidad social de una nueva camada de físicos. Las señales que muestran que una especialidad científica se ha desarrollado en una comunidad incluyen normalmente libros de texto, cursos universitarios, cargos designados, conferencias, sociedades profesionales y publicaciones especializadas. Algunos de estos indicadores existían antes de la guerra, pero la mayoría llegó sólo en los años cincuenta. Durante los años de guerra, hubo mucho debate en la American Physical Society acerca de la formación de las nuevas divisiones, lo cual era un deseo sobre todo entre los físicos de física aplicada, quienes sintieron que sus áreas de investigación no estaban suficientemente bien representadas o respetadas en la organización existente. En 1944 se realizó una propuesta de formar una división del estado sólido, o una división de física del metal, como se llamó al principio. La división fue finalmente aprobada en 1947, y desde aquel año se puede hablar de «físicos del estado sólido» como científicos, no únicamente involucrados en un área en particular de investigación, sino pertenecientes también a una comunidad científica distinta de las demás. Tuvieron que pasar varios años hasta que la nueva disciplina fuera impulsada, siendo una de las razonas de este retraso la competencia con la disciplina de la física nuclear, que en la época estaba desarrollándose con extrema velocidad y vigor. En efecto, la física nuclear y de partículas pareció monopolizar la física estadounidense durante un cierto periodo. No solamente estaba este campo generosamente apoyado por los fondos federales y privados, sino que también tenía una reputación intelectual y cognitiva como ciencia «heroica», con la cual ninguna otra ciencia podía competir. La física del estado sólido, por otro lado, había sido tradicionalmente considerada como menos valiosa por sus conexiones con la industria y ser un dominio menos fundamental de la naturaleza. Todavía tenía entre algunos científicos un aura de «física sucia». Slater dijo con posterioridad que en el MIT «nuestro departamento a menudo era mirando por encima del hombro, en cierto modo, por aquellos que pensaban que ningún físico imaginativo estaría en ningún campo que no fuera el nuclear o de la física de altas energías» (Weart 1992, p. 656).

Sin embargo, la nueva comunidad del estado sólido demostró ser muy competitiva, incluso con la más glamorosa disciplina de la física nuclear. Durante mucho tiempo, la física del estado sólido no tuvo su publicación propia; no la necesitaba realmen-

te, por la siempre en expansión *Physical Review,* que hacía las funciones de un muestrario de una gran parte de la literatura más valiosa del estado sólido. En 1964, la revista se publicó en dos secciones, una de las cuales tenía que ver principalmente con el estado sólido y la otra con la física nuclear y de partículas. Cuando se separó en dos publicaciones separadas en 1970, *Physical Review B* se dedicaba a los sólidos y era más grande que la *Physical Review A.* En el sentido del personal científico, había unos 350 doctores estadounidenses de física del estado sólido en 1951 o una décima parte aproximada de la población de físicos estadounidenses y menos de la mitad del número de doctores de física nuclear. Diez años después, la situación había cambiado de modo sustancial, no porque la física nuclear se hubiera convertido en menos popular, sino porque la física del estado sólido había despegado. Ahora había unos dos mil doctores en física del estado sólido en los Estados Unidos, casi tantos como físicos nucleares. Se ha estimado que el presupuesto total para la física del estado sólido en la época estaba en el orden de los 100 millones de dólares.

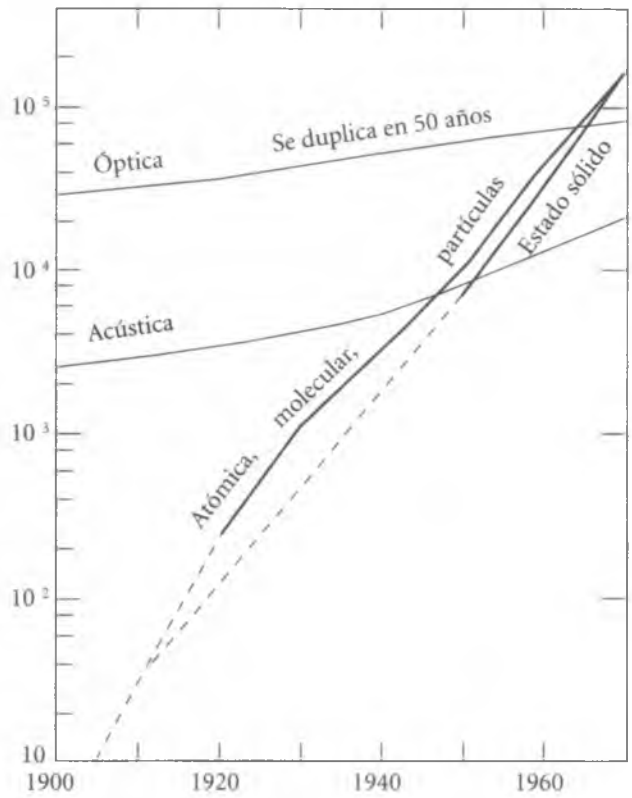


Gráfico 24.1. Producción acumulada de artículos sobre física del estado sólido y otros varios subcampos de la física. Fuente: Menard 1971. Reproducido con permiso de la editorial de *Science, Growth and Change,* de Henry W. Menard, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, derechos reservados (©) 1971 por the President and Fellows of Harvard College.

El crecimiento fenomenal de la física del estado sólido en el periodo de 1950 a 1968 se ilustra en el gráfico 24.1. Nótese que la tasa de crecimiento era un poco mayor que en la categoría «Atómica, molecular y de partículas» (que incluye física nuclear) y que en 1965, el número de artículos sobre estado sólido había sobrepasado a los de la categoría de las partículas. Un factor importante de crecimiento fue el auge de la industria de semiconductores y de otras industrias donde se veía útil la física del estado sólido. Mientras que en la física estadounidense en general, la proporción entre físicos empleados en la industria y en la educación superior era de un aproximado 1:2, la proporción entre los físicos de estado sólido era la inversa, de un 2:1. La filiación con la industria se ilustra posteriormente por la estructura del apoyo financiero: aunque la física de altas energías atrajera el montante mayor de inversión federal, la física del estado sólido era con diferencia, la mayor receptora de dinero industrial (tabla 24.1). Las cifras dadas aquí son de la física estadounidense, que era la comunidad nacional mayor y la única de la cual hay datos disponibles. La situación en otros países no era sustancialmente distinta, pero existía en una escala menor y las tendencias en el desarrollo vinieron algo más tarde. Según un estudio de publicaciones de estado sólido de 1961, los Estados Unidos y la Unión Soviética, cada uno de ellos, contaban con un cuarto aproximado de los artículos. Gran Bretaña y Japón contaba juntos con otro cuarto y Francia y Alemania juntos aproximadamente con una décima parte. A partir de ahí les seguían las naciones científicas menores, incluyendo Italia, los Países Bajos, Suiza y Dinamarca.

TABLA 24.1
Los cuatro mayores subcampos de física básica en EEUU en 1970

Campo	*Federal (nacional)*	*Industrial*	*Total*	*Porcentaje*
Altas energías	150	—	150	27
Estado sólido	56	80	136	24
Plasmas y fluidos	77	10	87	16
Nuclear	73	2	75	13

Nota: Las cantidades son en millones de dólares. *Fuente: PT*, julio 1972.

Grandes avances en superconductividad

Como se hace mención en el capítulo 6, la superconductividad era un completo enigma en los años veinte. Con la teoría de los metales de Bloch de 1928, cuajaron nuevas esperanzas de entendimiento del fenómeno y muchos físicos teóricos empezaron a aplicar las nuevas ideas del estado sólido al caso de la superconductividad. Los nombres de aquellos involucrados en el esfuerzo dan lugar a una lista impresionante de fí-

sicos de elite: Bohr, Heisenberg, Bloch, Landau, Brillouin, Frenkel, Kronig, Bethe, Casimir y Pauli estaban entre aquellos que, de manera optimista, trataron de resolver el problema. En cualquier caso, todas sus astutas ideas fracasaron. Bloch, que trabajó duramente en la superconductividad alrededor de 1931 (pero que nunca publicó su trabajo) posteriormente recordó que «estaba tan desanimado por mi resultado negativo que no encontré otra forma de progresar, y durante un tiempo considerable sólo me mantuvo la dudosa satisfacción de ver que otros, sin notarlo, seguían cayendo en la misma trampa. Esto me llevó a la declaración burlona de que todas las teorías de superconductividad pueden ser refutadas, más tarde citada en la forma más radical del "teorema de Bloch": la superconductividad es imposible» (Gavroglu y Goudaroulis 1989, p. 77).

El fracaso de los teóricos estaba de algún modo compensado por el progreso realizado por los experimentalistas, siendo el más importante el descubrimiento del efecto Meissner en 1933. Walter Meissner y Robert Ochsenfeld, dos físicos del Physikalisch-Technische Reichsanstalt de Berlín, descubrieron que cuando un cilindro sólido de hojalata o plomo era enfriado por debajo de su punto de transición en un campo magnético constante, las líneas de fuerzas eran expulsadas repentinamente del metal. El carácter diamagnético de los superconductores era totalmente inesperado, y encaraba a los teóricos con otro fenómeno más que necesitaba una explicación y ser incorporado en sus modelos teóricos. El efecto Meissner daba un estímulo importante a la primera teoría satisfactoria de la superconductividad, una teoría macroscópica desarrollada en 1935 por los hermanos Fritz y Heinz London, que en aquella época eran físicos refugiados en Inglaterra. La teoría proporcionaba ecuaciones electromagnéticas que describían la desaparición de la resistencia en un superconductor, así como el carácter diamagnético, que los hermanos London consideraban como una propiedad intrínseca de los metales superconductores. A pesar de este éxito, se percibió que la teoría London-London no era la respuesta final al problema de la superconductividad, al ser una teoría fenomenológica y no explicar los fenómenos en una escala microfísica.

Después de 1945, el trabajo teórico sobre la superconductividad continuó con vigor renovado, ahora asistido no sólo por las herramientas de la teoría del estado sólido sino también de la teoría cuántica de campos. Entre los que contribuyeron a la nueva fase se incluyen estrellas como Landau, Born, Heisenberg y Feynman, pero el problema parecía ser tan difícil de resolver como antes de la guerra. Feynman compartía con Bloch la fascinación hacia la superconductividad, así como su frustración por no ser capaces de resolver el problema. Poco antes de su muerte, Feynman dijo: «invertí muchísimo tiempo intentando entenderlo y haciendo todo lo que podía para poder aproximarme a ella [...] desarrollé un bloqueo emocional contra el problema de la superconductividad, así que cuando supe del artículo de BCS [Bardeen-Cooper-Schrieffer] no fui capaz de leerlo durante mucho tiempo» (Mehra 1994, p. 430). Fue un físico menos importante el que dio un paso significativo hacia una teoría microscópica. Herbert Fröhlich, un físico alemán que había emigrado a Inglaterra durante el régimen nazi, sugirió en 1950 que la superconductividad podría ser el resultado de una interacción entre electrones producida por las vibraciones cuantizadas de la red

cristalina (los llamados fonones). Apoyándose en esta idea y haciendo uso de métodos de la teoría cuántica de campos, desarrolló una teoría que implícitamente contenía el resultado de que una temperatura crítica decrecería con la masa atómica del superconductor. Intentos más tempranos de medición de una dependencia de la temperatura con relación a la masa habían dado resultados negativos y, hasta 1950, no hubo razones teóricas para creer en un efecto isotópico. El efecto fue, no obstante, descubierto en 1950, y Fröhlich ahora se daba cuenta de que su teoría incluía la predicción de que la temperatura crítica variaría con el inverso de la raíz cuadrada de la masa atómica. Cuando los experimentos realizados posteriormente en 1950 confirmaron la variación $M^{-1/2}$, naturalmente fueron interpretados como un gran apoyo a la teoría de Fröhlich. Sin embargo, aunque fue un avance notable, la teoría no era aceptable porque no explicaba la interacción electrón-fonón; en 1955 Bardeen y David Pines también hicieron constar la repulsión directa de Coulomb entre dos electrones y mostraron que, incluso bajo estas condiciones más realistas, habría una atracción ante bajas energías.

El avance realmente importante vino en 1957, con la interacción combinada electrón-fonón y con el conocimiento de que los electrones con espines opuestos pueden formar pares de bosones adheridos en metales, como resultado de la interacción de atracción entre electrones dirigidos a través de la red. Tales «pares de Cooper» ya habían sido sugeridos en 1946, en un contexto químico, pero no fue hasta 1956 cuando Leon Cooper le dio una justificación teórica a la idea. Además, sugirió que los pares deberían ser tratados no como entidades discretas, sino de manera colectiva. Al año siguiente, Cooper junto con sus colegas de la Universidad de Illinois John Bardeen y John Schrieffer, desarrolló la hipótesis del par electrón en una teoría microscópica detallada de superconductividad. Bardeen había dejado Bell Laboratories por Illinois en 1951 y Schrieffer era su doctorando, dedicado a la superconductividad. La teoría de los tres hombres, después conocida como la «teoría BCS» adscribía el estado de superconductividad esencialmente a una condensación de electrones en pares de Cooper con un momento común y siendo representados por una función de ondas única coherente. La teoría de Bardeen, Cooper y Schrieffer explicaba todos los hechos experimentales conocidos de superconductividad e hizo unas cuantas predicciones cuantitativas novedosas, las cuales eran rápidamente confirmadas. Como resultado, la teoría BCS fue aceptada como la respuesta correcta, si no la final, a la vieja pregunta de por qué algunos metales son superconductores. Como dijo Bardeen, «si existía una discrepancia, normalmente se encontraba, al repasarlo, que se había cometido un error en el cálculo. Todos los hechos enrevesados de los superconductores a partir de entonces encajaban limpiamente, como las piezas de un rompecabezas» (Bardeen 1973, p. 35). Los tres físicos estadounidenses recibieron el premio Nobel de 1972 en reconocimiento a su gran avance teórico, Bardeen por segunda vez, siendo el único físico doblemente laureado. Otro premio Nobel le siguió en el despertar de la teoría BCS, cuando el físico británico de 22 años Brian Josephson predijo que el estado superconductor cuántico debería ser capaz de filtrarse a través de una barrera entre dos materiales supercon-

ductores. El efecto Josephson, predicho en 1962, fue confirmado experimentalmente de manera rápida y usado en la tecnología de medición avanzada.

La teoría BCS no fue sólo un triunfo de la teoría del estado sólido cuántica, sino que también reafirmó la validez universal de la mecánica cuántica no relativista. A mediados de los cincuenta, llevaba buscándose desde hacía un cuarto de siglo una teoría microscópica de la conductividad, y la falta de éxito podía hacer sospechar razonablemente la indicación de alguna debilidad en la estructura de la propia mecánica cuántica. En una carta dirigida a Landau en 1954, Feynman contaba que, aparte de la gravitación, era el único fenómeno que todavía se resistía a una explicación en términos de mecánica cuántica. Tres años antes, la lista de fenómenos problemáticos se redujo de dos a uno. Desde luego el éxito de la teoría BCS no significaba un final para el trabajo teórico en superconductividad; al contrario, estimulaba mucho nuevos trabajos, tanto en superconductividad como en otras áreas de física teórica. A lo largo de la mayor parte de su historia, la teoría de la superconductividad hizo uso de avances teóricos en otros campos, especialmente en la teoría cuántica de campos. La transferencia teórica fue facilitada por el hecho de que varios de los científicos interesados en superconductividad venían de o tenían una sólida formación en la teoría cuántica de campos y física de partículas elemental: Fröhlich y Cooper, por ejemplo, eran expertos en estas áreas, que en apariencia eran tan distintas de la materia condensada a muy bajas temperaturas.

La superconductividad, especialmente después de la teoría BCS, atrajo a físicos teóricos que pensaron que merecía la pena investigar las conexiones entre la teoría de superconductores y la mucho más general teoría cuántica de campos. Por ejemplo, Yoichiro Nambu exploró la analogía entre las dos teorías de manera sistemática, y aplicó los métodos de la electrodinámica cuántica a la superconductividad. La teoría BCS no era invariante de gauge y varios teóricos, viendo esto como un defecto, intentaron a partir de ésta formular una versión invariante de gauge, sin perder el poder explicativo de la teoría. Nambu probó en 1960 que la falta de invariancia de gauge no es un defecto, sino que refleja la naturaleza de la superconductividad, en otras palabras, el hueco de energía dependiente de gauge. Nambu no solamente estaba interesado en explorar la superconductividad, sino que también percibió la existencia de una llamativa analogía matemática entre las dos teorías y que los métodos de la teoría de superconductividad podrían, por tanto, ser usados para resolver problemas en la teoría cuántica de campos (véase capítulo 22).

El estatus de la teoría BCS no sufrió afecciones significativas por los refinamientos y generalizaciones que tuvieron lugar después de 1957 y, hasta los años setenta, el campo de la investigación de superconductores puede que pareciera ampliamente completado, al menos en lo concerniente a la teoría, ya que los experimentalistas estaban ocupados aplicando el conocimiento teórico y buscando nuevos superconductores con mayores temperaturas críticas (T_c); este tipo de trabajo no tenía mucho que ver con la teoría y sí mucho con los experimentos sistemáticos y el saber de la profesión. John Hulm y Bernd Matthias, un inglés y un suizo que habían trabajado en los Estados Unidos, investigaron las propiedades de bajas temperaturas de los compuestos de metales de transición y ma-

teriales similares. La nueva clase de superconductores («tipo II») tenía campos magnéticos críticos muy grandes en comparación con los superconductores ordinarios. En 1953 Hulm y Matthias encontraron materiales (V_3Si y Nb_3Sn) con una T_c alrededor de 18 K, una modesta mejora con relación al registro previo de 15 K registrado por físicos alemanes en 1941. Experimentos ulteriores con otros materiales aumentaron el registro a 23 K, una temperatura obtenida en 1973 para un compuesto de niobio-germanio. Las previsiones de superconductores de T_c alta, y después, posiblemente, un gran avance en el uso práctico de la tecnología de los superconductores, parecían tenues hasta mediados de los ochenta, década en la cual J. Georg Bednorz y K. Alex Müller en el Laboratorio de Investigación de IBM en Zurich se concentraron en las llamadas perovskitas, una clase de minerales de metal-óxido (cerámicos). Los físicos alemán (Bednorz) y suizo (Müller) encontraron en 1986 que un sistema Ba-La-Cu-O tenía una T_c de 35 K, un descubrimiento que estimuló una oleada de trabajos en laboratorios de bajas temperaturas en todo el mundo. También era un reto para los teóricos, ya que la teoría BCS fracasó al explicar el nuevo tipo de superconductividad. Equipos liderados por Chung-Wu Chu en Houston y su antiguo estudiante, Maw-Kuen Wu, en Alabama investigaron sobre un material Y-Ba-Cu-O e informaron a principios de 1987 que era superconductor incluso en nitrógeno líquido ordinario. Una de las primeras cosas que hizo Chu fue redactar una solicitud de patente. La $T_c = 90$ K comunicada fue enseguida confirmada y comenzó un desarrollo explosivo en la investigación de superconductividad a alta T_c, con la reunión de marzo de 1987 de la American Physical Society como un primer clímax. Más de 4.000 físicos asistieron a la tumultuosa sesión, conocida como el «Woodstock de la Física» sobre las nuevas cerámicas superconductoras. Hasta agosto de 1987, el *Physical Review Letters* había recibido más de 300 manuscritos sobre superconductividad a alta T_c, El año siguiente un grupo japonés anunció superconductividad a 110 K y, posteriormente en ese año, un grupo estadounidense obtuvo $T_c = 125$ K en una cerámica de Tl-Ca-Ba-Cu-O. En 1995, el registro fue sobre 164 K, obtenido por un material de Hg-Ba-Ca-Cu-O bajo presión (gráfico 24.2). La importancia del descubrimiento de Bednorz y Müller fue reconocida por el comité Nobel en Estocolmo, que entregó el premio a los dos físicos en noviembre de 1987, haciendo que fuera uno de los reconocimientos más rápidos de la historia de los premios.

Una razón fundamental para el entusiasmo con que fue recibida la superconductividad a alta T_c era la posibilidad de que el descubrimiento pudiera desarrollarse en tecnologías para el mercado comercial. Ya en julio de 1987, cuando la Conferencia Federal sobre Aplicaciones Comerciales de la Superconductividad se reunió en Washington, D.C., el campo naciente había dado a luz a un negocio en expansión de las publicaciones científicas, incluyendo siete boletines semanales cubriendo las últimas novedades. Los científicos japoneses y los intereses económicos estaban particularmente activos en la carrera para comercializar la superconductividad e invertir los recursos que fueran necesarios para ganar la carrera. Las administraciones y la industria privada fundaron el International Superconductivity Center (ISTEC) o Centro Internacional de Superconductividad, con el propósito de desarrollar tecnologías comercialmente útiles basa-

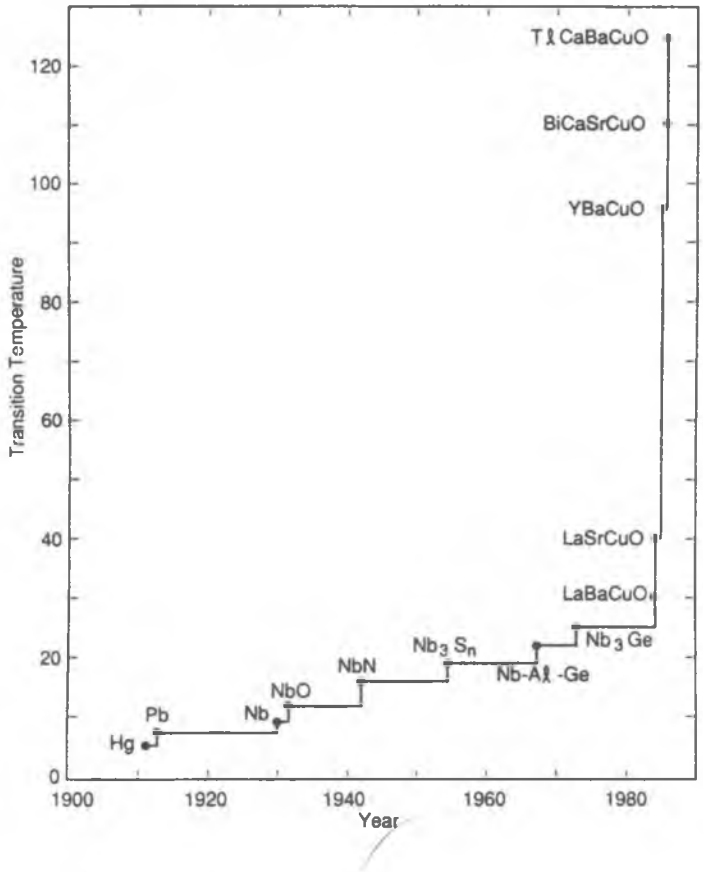


Gráfico 24.2. Mayores temperaturas críticas y los años en que fueron observadas. *Fuente:* P. F. Dahl, *Superconductivity: Its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides* (1992). Derechos reservados por Springer-Verlag. Usado con permiso.

das en la superconductividad a alta T_c. El ISTEC era un consorcio abierto a compañías en todo el mundo pero, de hecho, casi todas las compañías-miembro eran japonesas. Para participar de pleno en el programa, una compañía debía pagar unos 800.000 dólares inicialmente y posteriormente 110.000 dólares al año. De este modo, el ISTEC se garantizaba unos fondos iniciales de 35 millones de dólares en 1988 y 5 millones anuales a partir de entonces. Las compañías japonesas encontraron justificadas dichas inversiones; predecían que la superconductividad coparía un mercado anual de 30.000 millones de dólares anuales en el año 2000, pero la predicción era demasiado optimista. Como en el caso de investigación de la fusión, el camino desde el descubrimiento científico hasta la innovación tecnológica se convirtió en mucho más difícil e incierto que lo esperado.

CAPÍTULO 25

Física de ingeniería y electrónica cuántica

Todo comenzó con el transistor

De acuerdo con una encuesta realizada en 1951 entre los miembros de la American Physical Society, el 42 por 100 de los físicos trabajaba en la llamada física moderna, definida como teoría cuántica, física nuclear, electrónica y física atómica y molecular, y sólo el 27 por 100 trabajaba en la «vieja física» de teoría clásica, acústica y óptica. El campo más popular resultó ser la electrónica, con el 18 por 100 de los encuestados que la identificaban como «campo predominante de especialización»; en el segundo puesto estaba la física nuclear, con el 15 por 100. La fascinación por la electrónica, que en la época todavía significaba circuitos de válvulas de vacío, aceleró y tomó un nuevo giro cuando los dispositivos de estado sólido comenzaron a sustituir a las válvulas. El transistor de punto de contacto de germanio de 1948 fue un triunfo de la física del estado sólido, pero no fue un gran triunfo comercial (véase capítulo 24). No sólo era difícil el desarrollarlo como producto industrial –Western Electric empezó a fabricarlo en 1951– sino que también los transistores eran caros y funcionaban de manera bastante pobre comparados con las válvulas electrónicas en miniatura, con las que competían: por ejemplo, eran ruidosos, no muy fiables y sensibles a la humedad y a las distorsiones mecánicas, y en muchas ocasiones un transistor salía con distintas características comparado a otro de su misma serie. Tres años después de la invención de Brattain y Bardeen, no era obvio que el transistor tuviera ninguna aplicación práctica.

Una posible solución para los problemas era reemplazar el transistor de puntas por uno de unión pero, por un tiempo, la idea de Shockley se mantuvo en el campo teórico. Según el relato de dos historiadores, «Shockley podía diseñar cualquier cantidad de amplificadores semiconductores usando estas uniones en cualquier configuración imaginable, pero sus bocetos se quedarían básicamente como una forma de onanismo mental hasta que el arte de la fabricación de uniones finalmente llamara la atención de su inventiva explosiva» (Riordan y Hoddeson 1997, p. 177). Los problemas prácticos

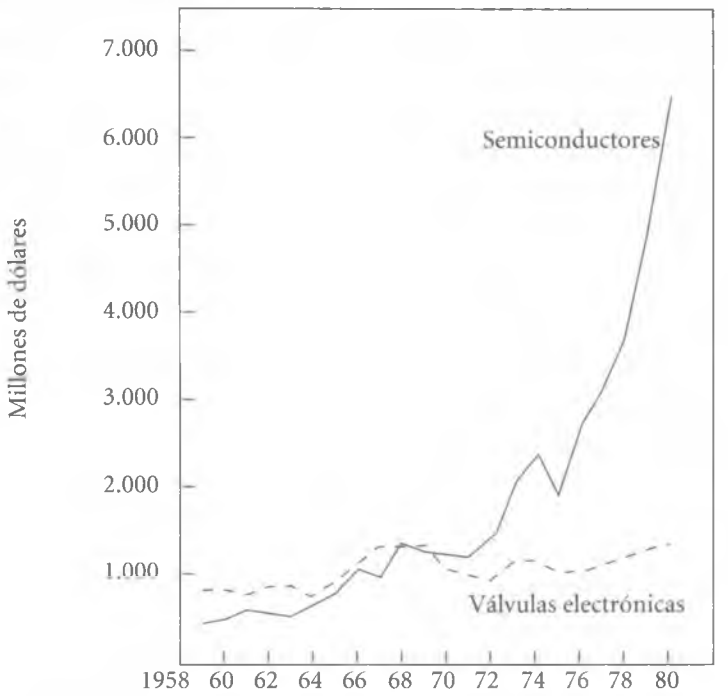


Gráfico 25.1. Gastos de los EEUU en válvulas electrónicas y aparatos semiconductores, 1959-1980. *Fuente:* W. A. Atherton, *From Compass to Computer: A History of Electrical and Electronics Engineering* (1984). Con permiso de Macmillan Press Ltd.

Aunque la empresa de Shockley no obtenía éxito comercial, indirectamente era de gran importancia por ser la fuente de otras cuantas pequeñas firmas establecidas por antiguos empleados. Uno de estos «traidores» (como los llamaba Shockley) fue Robert Noyce, quien fundó una compañía de semiconductores asociada con Fairchild, una firma de instrumental. Los científicos en Fairchild Semiconductor presentaron nuevos procesos de fabricación de transistores de silicio, que dieron lugar al transistor «mesa», innovador y de altas prestaciones, en 1957. En este aparato, el funcionamiento del transistor estaba restringido a una pequeña capa de superficie oxidada por un método conocido como tecnología planar. El método era adecuado para hacer circuitos integrados de numerosos transistores de silicio o germanio en un único bloque de semiconductor –o sea, sin el uso de cables conectores–. La idea de un circuito semiconductor integrado estaba en el aire y Noyle pidió una patente por su invento en verano de 1959. En el mismo año pero antes, y sin saberlo Noyle, otra patente similar había sido pedida por Jack Kilby, un científico retirado que colaboraba con Texas Instruments. El primer circuito integrado «monolítico» de Kilby incluía tres resistencias, un condensador y un transistor construido en una pieza de germanio. La invención del circuito integrado, realizada de manera independiente por Noyle y Kilby, inició un nuevo capítulo en la

historia de la microelectrónica. Este nuevo capítulo se desarrolló de una manera marcadamente similar al capítulo anterior de los transistores: los primeros circuitos integrados de Texas Instruments eran prohibitivos en su precio y fueron comprados casi exclusivamente por los militares, el primero por la fuerza aérea. En 1962, el precio medio de un circuito integrado era de 50 dólares y todos los circuitos eran comprados por los militares. El total de gasto federal en electrónica ese año fue de 10.000 millones de dólares, de los cuales 9,2 mil millones los gastaba el Departamento de Defensa. Cuando los precios empezaron a disminuir, el porcentaje de compra militar también disminuyó. En 1968, el precio medio había bajado a 2,30 dólares y menos de la mitad de los circuitos integrados iban para los militares.

En los años sesenta, la tecnología de circuitos integrados se desarrolló en gran medida gracias a Texas Instruments, Fairchild y otras firmas especializadas. La idea de un transistor de efecto de campo (o FET por sus siglas en inglés, Field-Effect Transistor), es decir, uno en el que la corriente a través de una capa fina semiconductora sea modulada aplicando un campo eléctrico externo, fue concebida por Shockley en una fecha tan temprana como 1945. En cualquier caso, hicieron falta quince años hasta que los científicos en Bell Laboratories tuvieran éxito en desarrollar un transistor de efecto de campo práctico a la medida del transistor de metal-óxido-silicio (o MOS). Este tipo de transistor se vio que estaba indicado para circuitos integrados porque los transistores MOS podían empaquetarse de manera más densa y requerían menos energía. A mediados de los sesenta, los circuitos integrados entraban en el mercado civil y enseguida fueron desarrollados en microprocesadores, siendo éstos usados para ordenadores y para muchas otras cosas. En 1963 la industria electrónica estadounidense produjo transistores por valor de 252 millones de dólares. De éstos, el 37 por 100 fue utilizado por la industria, sobre todo en ordenadores, y el 16 por 100 por consumidores.

El desarrollo completo, de una importancia obvia para el mundo moderno, empezó con el transistor, un producto de la física del estado sólido. En su manual sobre semiconductores de 1950, Shockley especuló brevemente sobre el futuro de la electrónica de transistores. Su especulación estaba más cercana a la realidad de lo que podía suponer: «Aquellos que han trabajado intensamente en el campo comparten el sentimiento del autor de un gran optimismo en relación con las potencialidades últimas. A la mayoría de los trabajadores les parece que se ha abierto un área comparable al área entera de electrónica del vacío y de descarga de gas». El cambio que ocurrió con el salto a circuitos integrados en los años sesenta fue menos radical que el salto anterior desde las válvulas elctrónicas a los transistores discretos. Los circuitos integrados no suponian una nueva física y eran, al contrario que el transistor, desarrolladas por ingenieros y científicos industriales más que por investigadores físicos. Noyce y Kilby difícilmente hubieran sido candidatos serios a los premios Nobel (aunque podrían haber sido nominados). A propósito del circuito integrado, Kilby apuntó: «en contraste con la invención del transistor, ésta era una invención con relativamente escasas implicaciones científicas [...] Ciertamente en aquellos años podría uno decir sobrada-

mente que había contriuido muy poco al pensamiento científico». Otro participante en el desarrollo temprano de los circuitos integrados, Douglas Warschauer, sugirió que, alrededor de 1960, «los ingenieros y tecnólogos en su gran mayoría ya no escuchaban a los científicos de investigación básica y realmente no estaban muy interesados en lo que los científicos básicos estaban haciendo (Braun y MacDonald 1978, pp. 103 y 138). Pero, aunque la industria de los semiconductores sólo estaba remotamente emparentada con los desarrollos en física pura, la aseveración de Kilby de que el circuito integrado «contribuyó muy poco al pensamiento científico» difícilmente puede considerarse correcta. De modo indirecto, las innovaciones en la microelectrónica fueron enormemente importantes para el pensamiento científico, en concreto, a través de los instrumentos electrónicos que revolucionaron muchas ramas de las ciencias experimentales. Cualquier experimento moderno de la física de altas energías, cualquier observación astrofísica y cualquier trabajo importante en física de materia condensada experimental dependen de modo crucial (aunque normalmente sin reconocimiento) de la técnica de los circuitos integrados inventados por Kilby y otros.

El microondas, el láser y la óptica cuántica

El láser, uno de los más importantes y versátiles instrumentos científicos de la física de la posguerra, era el descendiente directo del máser o amplificador de microondas, y el propio máser era el hijo de la ciencia de radares y tecnología del tiempo de guerra. Aunque la espectroscopía de microondas de gases fue inventada antes de 1940, el trabajo en radares y de los equipos sobrantes de radar provocaron un vuelco en la especialidad y la convirtieron en un campo sofisticado y rápidamente cambiante en 1950. De acuerdo con la evaluación de un historiador, «la espectroscopía molecular a través de la absorción de microondas en gases, es, sin ningún género de dudas, el primer ejemplo de un campo floreciente de investigación física creada –en todos los sentidos– por el radar» (Forman 1995, p. 422). Las microondas no sólo eran de gran interés para los físicos, sino que no eran de menor interés para los militares estadounidenses, que querían saber cómo construir una fuente de ondas milimétricas. Ésta no era una labor sencilla para los aparatos electrónicos existentes, como los magnetrones y los *klystrones*, ya que éstos no estaban diseñados para alcanzar este rango de longitudes de onda.

Después de haberse graduado en Caltech en 1939, Charles Townes estuvo ocho años en Bell Laboratories, donde trabajó con aparatos de radar y de navegación. En 1948 se unió al Laboratorio de Radiación de la Universidad de Columbia. Este laboratorio estaba subvencionado principalmente por los servicios militares (el Cuerpo de Señales y la Oficina de Investigación Naval, ONR por sus siglas en inglés), que estaban interesados en magnetrones que aportaban longitudes de ondas muy cortas. A finales de 1949, los investigadores del Laboratorio de Radiación habían desarrollado magnetrones que podían generar microondas de 3-4 mm; en 1951, Townes alcanzó una longitud de onda récord de poco más de 1 mm; sin embargo, los magnetrones de milímetros vio que eran básicamente inútiles en su sentido práctico. Eran insuficientes, muy

caros y tenían tiempos de vida que raramente excedían de las dos horas. En la primavera de 1951, como consultor de ONR y director de su Comité Consultor sobre la Generación de Ondas Milimétricas, Townes lanzó la idea de cómo generar las ondas de una manera completamente diferente. La idea de Townes era la de usar los propios osciladores de la naturaleza, las moléculas y los átomos, y usar emisión estimulada en un haz de moléculas como fuente para ondas milimétricas fuertemente amplificadas. Una idea similar fue sugerida de manera independiente por Joseph Weber, quien sin embargo no desarrolló su proyecto en un aparato práctico (éste es el mismo Weber que conocimos en el capítulo 23, que afirmaba haber detectado las ondas gravitacionales). La base científica de la innovación de Townes, el concepto de emisión estimulada, volvió a la teoría de radiación de Einstein de 1917, pero fue un concepto que no recibió mucha atención hasta los años cincuenta.

En un crucial experimento de 1950, Edward Purcell y Robert Pound demostraron la emisión estimulada y también la inversión de la población –esto es, la existencia de condiciones de no equilibrio de un estado de una mayor energía más poblada que el estado de baja energía. Para traer moléculas desde el estado de energía menor al mayor, pueden ser «bombeados» ópticamente, o sea, excitados por la absorción de fotones entrantes. El método de bombeo óptico fue propuesto originalmente por el físico francés Alfred Kastler en 1950 y verificado experimentalmente por su grupo en París dos años después. La emisión estimulada, la inversión de la población y el bombeo óptico fueron ingredientes clave en el máser, pero hasta 1951 vivieron por separado y no desempeñaron un papel determinante en la física. El último ingrediente crucial fue la idea de usar una cavidad resonante para producir un *feedback* positivo y desde ahí obtener una ganancia neta de energía, un proceso que Townes describió originalmente como una «reacción [molecular] en cadena autosostenible». En 1951 los ingredientes principales del método máser eran bien conocidos, pero antes de Townes nadie los había combinado con el propósito de amplificar microondas. Una de las razones del tardío desarrollo del concepto de máser podría ser el haber conjuntado el conocimento del físico con el ingenieril. Townes escribió, posteriormente, que «las necesarias ideas mecánico-cuánticas no se conocían o no eran apreciadas en general entre los ingenieros eléctricos, mientras que los físicos [...] con frecuencia no estaban familiarizados con los conceptos propios de la ingeniería eléctrica. Es comprensible que el crecimiento real de este campo viniera poco después de la Segunda Guerra Mundial, ya que ésta llevó a muchos físicos a la frontera entre la mecánica cuántica y la ingeniería eléctrica» (Bromberg 1991, p. 222).

La nueva idea de Townes de mayo de 1951 fue el concepto de máser o «aparato para obtener microondas cortas a partir de sistemas atómicos o moleculares excitados» como lo titulaba en su cuadernillo de laboratorio. En vez de hacer que las moléculas respondieran de modo pasivo al estímulo de un haz de electrones, Townes concibió la idea de moléculas resonantes que generaran las microondas y además llevaran consigo la energía y la frecuencia. Otros físicos del Laboratorio de Radiación de Columbia no confiaban en la idea y argumentaban que un método alternativo de generación de

microondas, basado en la radiación Cherenkor, parecía más prometedor. De todos modos, Townes se mantuvo con su idea de osciladores moleculares y, en la primavera de 1954, obtuvo el primer éxito en la forma de detección de oscilaciones de moléculas de amoníaco. Con el amplificador de 1,25 cm que construyó junto con James Gordon y Herbert Zeiger, Townes pudo demostrar la existencia del primer «*maser*», un acrónimo del inglés *microwave amplification by stimulated emission of radiation*, o amplificación de microondas a través de emisión estimulada de radiación, o como fue presentado en el primer informe para el *Physical Review*, «un aparato experimental que puede ser usado como un espectrómetro de microondas de muy alta resolución, un amplificador de microondas o un oscilador muy estable». El término máser fue acuñado en un artículo más completo de 1955 titulado «El Máser, Nuevo Tipo de Amplificador de Microondas, estándar de frecuencia y espectrómetro». En ese tiempo, un haz de láser de amoniaco estaba listo y también estaba lista la petición de patente de Townes, el comunicado de prensa de la invención en la Universidad de Columbia sobre el «máser» o «reloj atómico») y el informe de Townes para el Cuerpo de Señales. En el primer máser práctico, construido de acuerdo con las ideas de Townes de 1951, las moléculas de amoniaco eran enviadas a través de un sistema de filtro eléctrico (un «enfocador»), en el cual las moléculas en el estado excitado eran separadas de aquellas en el estado más bajo. El haz de moléculas excitadas entonces entraba en una cavidad donde se creaba un campo magnético oscilante emitido como microondas salientes. Tuvieron que hacerse los experimentos con su primer máser para que Townes y sus colaboradores se dieran cuenta de una de sus propiedades más valiosas, básicamente que estaba bastante libre de ruido. Además, la amplificación obtenida al introducir la radiación en la cavidad no estaba originalmente considerada como una parte esencial del concepto del máser. Al principio Townes no le prestó atención a lo que quizá es el hecho más característico de los máseres y láseres, la coherencia de las ondas. Por supuesto, no era la primera vez que un científico realizaba una brillante innovación sin un claro entendimiento de lo que había hecho.

El máser de amoniaco de Townes, basado en la inversión de población entre dos estados de energía, fue rápidamente continuado por nuevos tipos de máser y de métodos de obtención de inversión de población. En 1955, Nikolai Basov y Alexander Prokhorov, en el Instituto Físico Lebedev en Moscú, sugirieron un proyecto de bombeo que permitiera la inversión continua de población, y por tanto, una amplificación continua. La idea hizo uso de transmisiones cuánticas en átomos con tres niveles de energía, de los cuales el nivel intermedio era metaestable (por ejemplo, tenía un tiempo de vida largo). El año siguiente, una idea similar fue analizada con más detalle y aplicada a los máseres de estado sólido por Nicolaas Bloembergen, un físico holandés-americano que trabajaba en la Universidad de Harvard. El trabajo de Bloembergen tuvo una influencia a largo plazo en la física de máser y de láser, y en electrónica cuántica en general, porque aportó a esas áreas los conceptos de la relajación magnética y de la resonancia magnética nuclear (NMR por sus siglas en inglés). Los primeros máseres paramagnéticos eficientes basados en la teoría de los tres niveles de Bloembergen

aparecieron en 1958. La exitosa familia de los máseres de rubí fue iniciada por Chihiro Kikuchi y sus colegas en la Universidad de Michigan. Por su baja temperatura de ruido, los máseres de estado sólido encontraron un uso temprano en los radiotelescopios y en antenas de microondas. Por ejemplo, Penzias y Wilson hicieron uso de un amplificador máser de rubí en su célebre descubrimiento de 1965 de la radiación cósmica de fondo.

Después de 1955, la idea de aplicar el principio de máser a longitudes de ondas más pequeñas del rango visible o de los infrarrojos era natural. Originariamente se pensó que esto sería muy difícil, y que se necesitaría una entrada de energía muy grande y quizá prohibitiva. Fue de nuevo por instigación de los militares –esta vez a través de la Oficina de Investigación Científica de la Fuerza Aérea– por lo que Townes se encargó del problema. En 1957 lo investigó de manera teórica y alcanzó la conclusión de que probablemente no habría ningún problema serio en aplicar técnicas de máser a la región visible. Aunó fuerzas con Arthur Schawlow de Bell Laboratories y, en 1958, los dos físicos publicaron un análisis detallado en el *Physical Review* sobre «Máseres infrarrojos y ópticos» concluyendo que la posibilidad es favorable para los máseres que producen osciladores en las regiones infrarroja y óptica». Al mismo tiempo, AT&T envió una petición de patente. El artículo de Townes-Schawlow fue la base teórica para el láser, pero en la época era sólo una teoría.

Durante los dos años siguientes, varios físicos e ingenieros, tanto en universidades como en laboratorios de investigación corporativos, competían para desarrollar un láser operativo. Uno de ellos fue Gordon Gould en la compañía privada TRG (Technical Research Group), quien en otoño de 1957 había esquematizado de manera independiente cómo podría ser construido un láser. También fue Gould quien utilizó por primera vez el término «*laser*» como acrónimo en inglés de *light amplification by stimulated emission of radiation*, o amplificación de luz a través de la emisión estimulada de radiación. De una manera típica para la época, poco después del impacto del *Sputnik,* la mayor parte de la investigación estaba pródigamente subvencionada por las agencias militares. Una de estas agencias era la ARPA, *advanced research projects agency* o Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada, que estaba interesada en promocionar el trabajo sobre el láser como una posible arma. En 1959, por casi un millón de dólares, ARPA involucró a TRG en un programa secreto con el propósito de desarrollar un láser funcional. Usando distintos métodos y aproximaciones, los científicos en Bell Laboratories y en el Centro Watson de la IBM también trabajaron duro para construir un láser práctico. Y así lo hicieron Theodore Maiman, un físico de los laboratorios de investigación Hughes, que se centró en los medios de láser sólido más que en los láseres gaseosos investigados por otros grupos. Maiman trabajó con los iones de cromo en vez de con una pequeña parte de cristal de rubí y encontró la forma de obtener inversión de población excitando los iones ópticamente mediante una lámpara de destellos de xenón. Los experimentos confirmaron sus cálculos y, el 16 de mayo de 1960, obtuvo su primera emisión de láser. Poco después, Maiman tenía un láser de rubí listo y rápidamente entregó un artículo para el *Physical Review* sobre la «Acción del máser óptico en el rubí». Sin embargo, el editor rechazó el artículo, posiblemente por-

que éste no casaba con la política de la publicación de admitir únicamente artículos que «contengan contribuciones significativas a la física de naturaleza básica». Por esta razón, el primer anuncio del láser –un artículo breve titulado «Radiación óptica estimulada en el rubí»– apareció en la publicación británica *Nature*. En 1961, Maiman y sus colaboradores entregaron una descripción más detallada de sus experimentos al *Physical Review*. Esta vez, el artículo fue aceptado. Inicialmente, había cierta incertidumbre sobre si Maiman realmente había obtenido un efecto láser con el rubí y tuvo que pasar algún tiempo antes de que fuera reconocido como inventor del láser.

En 1960-1961, varios grupos de científicos desarrollaron otros tipos de láser. A finales de l960, Ali Javan y su grupo en Bell Laboratories consiguieron con éxito una descarga de láser gaseoso que operaba con átomos de neón excitado por colisiones con átomos de helio. Esto fue una innovación importante, porque fue el primer láser que funcionaba con continuidad. El primer láser helio-neón operaba en la longitud de onda de infrarrojos de $1{,}15 - 10^{-6}$ m. Otro resultado importante en la historia temprana del láser fue la construcción en 1962 de un láser que usaba cristal de arseniuro de galio, el primer ejemplo de la familia de crecimiento rápido de láseres semiconductores. Hubo que esperar varios años hasta que la investigación sobre el láser se convirtiera en un campo primordial en la física pero, a mediados de los años sesenta, el nuevo campo había entrado en un nuevo estadio de desarrollo rápido. Una bibliografía recopilada en 1964 recogía unas 600 referencias a láseres, incluyendo estudios y textos que no eran de investigación. Dos años después, la bibliografía puesta al día contenía 3.390 referencias, con un índice de 3.335 autores. Casi todos los artículos tempranos sobre investigación del láser se publicaron en el *Physical Review* o en *Applied Physics Letters*. Mientras que el campo florecía, hubo un incremento en la aparición de publicaciones en más revistas especializadas, como *Optics Communications*, *Applied Optics* y *Laser Focus*.

El láser fue bienvenido y estudiado tanto por físicos académicos como industriales. Alrededor del 70 por 100 de los artículos estadounidenses de láser listados en el *Physics Abstract* a principios de los sesenta era enviado por laboratorios industriales. No sorprende que una gran parte de investigación sobre láser en los Estados Unidos, ya fuera en las universidades o en la industria, estuviera subvencionada por la institución militar. Se ha estimado que los gastos del Departamento de Defensa en investigación sobre láser en 1963 fueron de unos 20 millones de dólares, y que hasta el 80 por 100 de los artículos de investigación sobre el láser recibían al menos apoyo económico parcial del Departamento de Defensa. El láser era de gran importancia, no sólo como instrumento para la ciencia y por sus múltiples aplicaciones en las tecnologías militar y civil, sino también porque fue un factor crucial en el renacer de la óptica que se dio en los años sesenta. La óptica estuvo estancada durante dos décadas y, alrededor de 1950, se consideraba como una especie de disciplina gris con un gran pasado, pero sin visos de tener un gran futuro (véase el gráfico 24.1). Junto con la holografía, los usos ópticos de los semiconductores y el auge de la óptica no lineal, el láser creó un desarrollo nuevo y vigoroso para la ciencia óptica.

A diferencia del máser, el láser también se convirtió en un éxito arrollador en el mercado comercial. A este respecto, su trayectoria fue similar a la del transistor. En 1993 se estimaba que el mercado del láser sumaba un valor de unos 20.000 millones de dólares, y que más de tres cuartos de este dinero era civil. Las aplicaciones comerciales del láser son generales y muy bien conocidas, incluyendo no sólo cirugías y medicina, impresión y comunicaciones ópticas, sino también discos compactos, soldaduras de metales, lectores de tarjetas electrónicas y reproductores de audio y vídeo; además, los láseres desempeñan un papel importante en diversos instrumentos científicos. Los más producidos y versátiles de entre la gran cantidad de tipos de láser han sido los de semiconductores: en 1988, se produjeron unos 200 millones de láseres sólo de este tipo.

El desarrollo de los máseres y láseres se llevó a cabo principalmente en los Estados Unidos, pero hubo también contribuciones importantes de los físicos rusos y, después de 1960, de los físicos japoneses y europeos. En el Instituto Lebedev en Moscú, Basov y Prokhorov se percataron de la posibilidad de un máser de amoníaco independientemente de Townes, sugirieron el método de tres niveles, y en 1958 propusieron el uso de los semiconductores para los láseres. Townes, Basov y Prokhorov recibieron el premio Nobel en 1964 por sus contribuciones. Dos años después, Kastler fue honrado con el premio y en 1981 dos de los otros pioneros de las técnicas láser, Bloembergen y Schawlow fueron igualmente galardonados. Maiman, el inventor del láser, no fue reconocido como merecedor del premio.

Las fibras ópticas

El primer sistema de comunicación extensivo, el telégrafo óptico de Claude Chappe de 1790, estaba basado en señales de luz, pero las innovaciones consiguientes en las telecomunicaciones –desde la telegrafía eléctrica hasta la radio– hicieron uso de partes muy diferentes del espectro electromagnético y transmitieron las señales a través de cables metálicos o bien a través de la atmósfera. Desde alrededor de 1860, la telegrafía óptica prácticamente desapareció. Aunque la idea de usar la luz enviada a través de un tubo de vidrio como medio de almacenamiento y transmisión de información fuera planteada en los años treinta, hubo que esperar a después de la guerra para que comenzaran los experimentos con fibra óptica. Uno de los primeros estudios fue realizado a principios de los años cincuenta por un grupo de científicos holandeses asociados con la Universidad Tecnológica de Delft. Su investigación fue subvencionada por el Consejo de Investigación de la Defensa de los Países Bajos, e intentaba proveer a los nuevos submarinos del país de periscopios mejorados –no sólo era en los Estados Unidos donde el dinero militar apoyaba la investigación en física–. Para asegurar un reflejo absoluto, los científicos de Delft desarrollaron vidrio y fibras de plástico cubiertos por una capa de un índice refractivo más bajo. Las fibras, en todo caso, no encontraron uso ni militar ni comercial, y la compañía Philips declinó comprar y desarrollar la tecnología.

El primer uso práctico de las fibras revestidas no fue en las comunicaciones sino en la medicina, concretamente en el endoscopio flexible para gastroscopia inventado en 1957. En aquella época, se vio que para que la fibra óptica funcionara a través de grandes distancias, deberían ser superados dos problemas críticos: en primer lugar, se necesitaba una fuente de luz coherente y fuertemente enfocada; en segundo lugar, la pérdida de señal era prohibitivamente grande en las fibras de vidrio existentes como para hacer de ellas guías de ondas prácticas.

Con la invención del láser, parecía que el primer problema iba por el buen camino para ser resuelto. Mientras que los láseres gaseosos no eran prácticos, el potencial para los láseres semiconductores fue reconocido en una fecha temprana, en particular porque este tipo de láser era compacto y fácil de modular a través de una corriente de entrada. Las primeras fuentes de láser utilizadas en experimentos de fibra óptica fueron los láseres de arseniuro de galio y, como receptores, varios tipos de fotodiodos de estado sólido encontraron su aplicación. Los láseres de diodo semiconductor obtenidos por primera vez en los Laboratorios Bell en 1970 se comprobaron como aun más útiles que como fuentes de comunicaciones ópticas. De manera alternativa, otro invento de AT&T pudo utilizarse, el diodo emisor de luz o LED. Aunque la tecnología de transistores no desempeñaba un papel directo en el desarrollo de sistemas de fibra óptica, sí que lo desempeñaba de forma indirecta, como una fuente de láser semiconductores y fotodiodos.

El láser encendió mucho interés en las comunicaciones ópticas, un campo al que hasta entonces se le había dado poca prioridad por parte de ingenieros y científicos industriales. Con el problema de la fuente en principio solucionado, el interés se dirigió hacia el medio de transmisión. La cuestión crucial era si era posible diseñar fibras finas, hechas de vidrio o de cualquier otro material transparente, con una atenuación óptica ampliamente menor que los mejores tipos de vidrio conocidos en la época. La industria del vidrio óptico no estaba preparada para el tipo de trabajo científico y de desarrollo necesario para poder producir el vidrio de calidad extremadamente fino requerido para la transmisión óptica. La cuestión global fue investigada concienzudamente por dos físicos que trabajaban para Standard Telecommunications Laboratories en Londres, Charles Kao y George Hockham. En un artículo publicado en el *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, los dos físicos calcularon y debatieron varios modos de pérdida en una fibra guía de ondas de sección transversal circular. Este trabajo, de gran influencia, estaba basado en la teoría electromagnética clásica y consistía esencialmente en resolver las ecuaciones de Maxwell ante las condiciones de frontera dadas por la estructura de una fibra de vidrio cilíndrica. Fue un trabajo que podría haber sido entendido y apreciado por Lord Rayleigh y otros especialistas en la teoría de ondas electromagnéticas alrededor del cambio de siglo –de hecho, el primer análisis teórico completo de propagación electromagnética en cilindros dieléctricos fue realizado ya en 1910 por Peter Debye y su estudiante D. Hondros.

Kao y Hockham predijeron que el valor crítico para la pérdida de señal en una fibra óptica era de 20 decibelios por kilómetro (dB/km) o menos, correspondientes a

aproximadamente el 1 por 100 de transmisión a través de un kilómetro de fibra. Las fibras de vidrio a las que se podía acceder exhibían una pérdida de aproximadamente 1.000 dB/km; por tanto, el cálculo de Kao-Hockham mostraba que eran necesarias mejoras de dos órdenes de magnitud (téngase en cuenta que el dB es una unidad logarítmica). Esto fue una mala noticia, pero Kao y Hockham concluyeron que era «difícil, pero no imposible» desarrollar tales fibras de bajas pérdidas. «Los estudios teóricos y experimentales indican que una fibra de material vidrioso construido en una estructura revestida con [...] un diámetro total de unos 100 λ_0 [100 veces la longitud de onda] representa una posible guía de ondas práctica con un potencial importante como nuevo medio de comunicación», escribieron. «La comprensión de una guía de ondas de fibra de éxito depende, en el presente, de la disponibilidad de material dieléctrico adecuado de baja pérdida» (Bray 1995, p. 271).

El trabajo de Kao y Hockham fue un reto para la industria del vidrio e impulsó a laboratorios privados y gubernamentales a lo ancho del mundo a aceptar el reto. Bell Laboratories, laboratorios de telecomunicaciones nacionales, universidades técnicas e industrias privadas se comprometieron seriamente en el intento de encontrar materiales adecuados para la fibra óptica. Corning Glass Works en los Estados Unidos, la compañía de vidrio mayor y más orientada hacia la investigación en todo el mundo, estableció un grupo de investigación para encontrar una solución. El grupo estaba liderado por Robert Maurer, un físico con un doctorado en el MIT que se había unido a Corning en 1952 como físico aplicado. El equipo de Corning se centro en el silicio fusionado, al cual añadía óxidos para incrementar el índice de refracción. No sólo las nuevas fibras de Corning tenían propiedades electromagnéticas excelentes, sino que también eran mecánicamente fuertes y químicamente estables. De un modo interesante, la innovación estaba inspirada por el trabajo de la industria del transistor con silicio puro y dopado. Las primeras fibras de silicio dopadas estaban listas en 1970 después de cuatro años de trabajo a menudo frustrante. Con un factor de atenuación de 16 dB/km, eran muy prometedoras e indicaban que el desarrollo de las fibras de vidrio ópticas era simplemente cuestión de tiempo. Durante los años siguientes, Corning desarrolló métodos de fabricación para el nuevo tipo de fibra de vidrio y produjo versiones aun más eficientes. En 1975, Maurer y su equipo alcanzaron los 4 dB/km y en 1980 la pérdida se redujo a 0,3 dB/km. Al mismo tiempo, investigadores japoneses informaron de un récord de baja atenuación de 0,2 dB/km, muy cerca del límite teórico para las fibras de silicio dopadas. A finales de los años setenta, las comunicaciones de fibra óptica habían pasado de ser un invento a ser una innovación, y los primeros cables de fibra comerciales se hicieron operativos. Entre los usos más importantes de la nueva tecnología estaban los cables submarinos, siendo el primero el enlace del canal de 1986 entre Inglaterra y Bélgica. Dos años antes, el primer cable de fibra óptica transatlántico, denominado TAT 8, fue abierto para dar servicio entre Inglaterra y Norteamérica. El innovador proyecto, una colaboración entre AT&T, British Telecom y France Telecom, tenía una capacidad correspondiente a 40.000 conversaciones telefónicas, o casi el doble de la capacidad de cable existente a través del Atlántico. La fibra óptica conti-

nuó con su rápido desarrollo a lo largo de los años ochenta y noventa. Una de las innovaciones más importantes fue la invención en 1987 de una forma de amplificar las señales en una fibra óptica a través de la inserción, directamente a la línea, de una fibra dopada con iones del elemento erbio, del grupo de tierras raras. Junto con el desarrollo de las fibras de láser, los amplificadores dopados con erbio iniciaron una nueva fase en las comunicaciones de fibra óptica.

CAPÍTULO 26

La ciencia atacada, ¿la física en crisis?

Signos de crisis

Desde alrededor de 1965, la física de los Estados Unidos y, en cierto modo, también la física europea, parecía agitarse de nuevo en aguas turbulentas. Los años desde el Proyecto Manhattan habían sido un periodo sin precedentes e ininterrumpido de crecimiento, optimismo, apoyo político y prestigio social. A finales de los sesenta, la guerra en Vietnam resultó ser un tema muy controvertido en los Estados Unidos y en los círculos académicos los sentimientos antimilitaristas se hicieron más comunes y aceptados. Ya que una parte tan grande de la comunidad física estadounidense trabajaba en proyectos militares o estaba siendo subvencionada por dinero militar, los físicos se vieron identificados fácilmente con el complejo militar-industrial que en ese tiempo estaba en el punto de mira. Alrededor de la misma época, la energía nuclear empezó a perder algo de su inocencia y fascinación. Por primera vez, la gente empezó a preguntarse si las centrales de energía nuclear eran realmente un camino sin problemas para conseguir energía barata que hasta entonces se daba por supuesta. ¿Podía estar uno confiado de que eran seguros los reactores? ¿Qué decir de los residuos radiactivos? ¿Y cómo se podía prevenir que dictadores usaran la tecnología de la energía nuclear para producir bombas atómicas? La incomodidad temprana con la energía nuclear fue fácilmente extrapolada con una incomodidad con los científicos asociados como más cercanos con la tecnología: los físicos. Una consecuencia más directa fue la decisión del presidente Ford de 1974 de abolir la Comisión de Energía Atómica y reponerla en 1977 con un nuevo Departamento de Energía (en inglés Department of Energy, DOE). Era más que un símbolo importante el que la palabra «atómica» desapareciera. La Guerra de Vietnam y el creciente interés en problemas medioambientales eran sólo dos de los importantes factores en la compleja red de reorientaciones políticas, culturales y emocionales que agitaron al mundo occidental en ese periodo.

En la misma época, mientras que los valores culturales tradicionales se vieron atacados, la relación entre la administración pública y la ciencia se transformó. Los polí-

ticos y administradores empezaron a cuestionarse la máxima de que lo que era bueno para la ciencia era bueno para la sociedad. Una actitud más desilusionada con respecto a la ciencia se hizo notar en cambios en el sistema de subvenciones estadounidense, que causaron preocupación entre muchos físicos. La enmienda de Mansfield de 1969 prohibía al Departamento de Defensa que gastara dinero en investigaciones que no estuvieran directamente relacionadas con propósitos militares. Muchos físicos estaban a favor de la enmienda, pero tenían razones para temer sus consecuencias. Aunque la Fundación Nacional de la Ciencia (National Science Foundation, NSF) recibió una suma extra de 85 millones de dólares, no fue capaz de compensar del todo la pérdida de apoyo de las instituciones militares. Además de esto, una partida incrementada del dinero de la NSF se asignó a proyectos de investigación socialmente útiles, algunos de ellos en las ciencias sociales, más que a la ciencia básica. En 1970, William Koch, director del American Institute of Physics, comentó que la física «de estar reconocida como una ciencia desesperadamente necesaria para la supervivencia nacional y para su prestigio» se ha colocado en «un contexto social más convencional, con nuevas prioridades» (Schweber 1994b, p. 143). Durante dos décadas había sido comúnmente aceptado que la inversión en ciencia básica se compensaría en su mayoría en el sector industrial y esto aseguraría el crecimiento económico. Ahora algunos economistas punteros negaban que el apoyo económico público a la ciencia fuera un factor de innovación. Según Harry Johnson, profesor universitario de Economía, no existía una correlación clara entre la cantidad de dinero que un país se gastaba en la ciencia con su crecimiento económico. La ciencia básica, argumentaba en 1968, era «pura y llanamente un bien de lujo, accesible sólo para las muy escasas personas en la sociedad que han recibido la educación para poder apreciar sus misterios esotéricos y que han sido capaces de persuadir a un número suficiente de sus conciudadanos para que sustenten sus iniciativas» (Kragh 1980b, p. 39). Era una característica que encajaba bien con gran parte de la comunidad física y un argumento que, si se aceptaba, encaminaría la física básica hacia una caída en picado del sustento gubernamental de la investigación. El nuevo debate era que los físicos sentían una presión incrementada para justificar sus requisitos monetarios. Ya no bastaba con apelar a criterios puramente internos de curiosidad científica o postular, como hizo Schwinger en 1965, que «el nivel científico de cualquier periodo está personificado en la actitud actual con relación a las propiedades fundamentales de la materia. La visión del mundo de un físico define el estilo de la tecnología y la cultura de la sociedad y le da una dirección al progreso futuro» (Schweber 1997, p. 664).

En dólares constantes de 1983, las subvenciones federales para la investigación en física básica cayeron de 1.045 millones de dólares a 690 millones en 1976 –un 34 por 100 menos–. El apoyo posteriormente creció lentamente, pero en 1983 todavía significaba menos del 85 por 100 del nivel de 1967. Durante el mismo periodo, los gastos del Departamento de Defensa y la NASA en investigación básica cayeron de manera mucho más drástica que lo que se incrementaron los gastos de la NSF (véase tabla 26.1). Mientras que caía el apoyo, también lo hacía la producción de nuevos físicos. A prin-

TABLA 26.1
Obligaciones de EEUU para investigación básica en física,
en millones de dólares de 1983

Fuente	*1967*	*1976*	*1984*
NSF	94,8	126,4	151,6
AEC/DOE	519,8	379,5	563,9
NASA	216,8	107,0	101,6
Defensa	179,6	60,4	126,1
Total federal	1.045,2	690,2	960,4

Nota: Basado en datos de Brinkman *et al.*, 1986.

cipios de los ochenta, más de 1.600 físicos obtuvieron su doctorado en las universidades estadounidenses. Diez años después, el número decreció a poco más de 900 (gráfico 26.1). El número de doctores en el subcampo más amplio, la física del estado sólido, decreció de 442 en 1971 a 202 en 1980; en la física de partículas elementales, el segundo subcampo por volumen, la caída fue de 278 a 117. Sólo la óptica experimentó un crecimiento de 25 a 43, sin duda en parte como resultado del «efecto láser» y la importancia incrementada de la óptica en las industrias de alta tecnología. El mercado laboral en general era desfavorable, y un porcentaje apreciable de los nuevos doctores en física estaban desempleados o tenían que aceptar trabajos no relacionados con su formación. Ya en los primeros años treinta, la crisis ocupacional fue limitada y tuvo una duración relativamente corta. En 1980, los «buenos viejos tiempos» habían vuelto en gran parte, o así parecía. Sin embargo, el número de graduados en física continuó estando en un nivel bajo y, además de esto, un porcentaje importante de graduados eran ciudadanos extranjeros, europeos o asiáticos. Debería hacerse notar que la física estadounidense experimentó una crisis sólo en un sentido relativo, en concreto con relación al extremo apoyo y prestigio que había disfrutado durante las dos décadas previas. Además, la crisis se relacionaba con factores externos y no afectaba de manera seria el progreso del conocimiento científico. Sin duda, los años durante los cuales la crisis fue más debatida, especialmente entre la comunidad de física de altas energías, eran justo los años en que la física de altas energías consiguió tantos avances notables que la gente empezó a hablar de la «nueva física».

La crisis en la física estadounidense en los años setenta no se manifestaba sólo en términos de apoyo económico y reclutamiento de nuevos físicos. Estos problemas también tenían conexión con una más general crisis «moral», y en cierta medida eran resultado de esta crisis, la cual amenazaba con ser aun más seria que la crisis en recursos materiales. Mientras que los físicos estaban acostumbrados a ser los héroes de la nación, y la física, la reina de las ciencias, desde finales de los sesenta la confianza pública en las ciencias cayó rápidamente. Una encuesta de 1971 reveló que sólo el 37 por 100 del público valoraba a los científicos de modo «muy favorable». Y no fue sólo el públi-

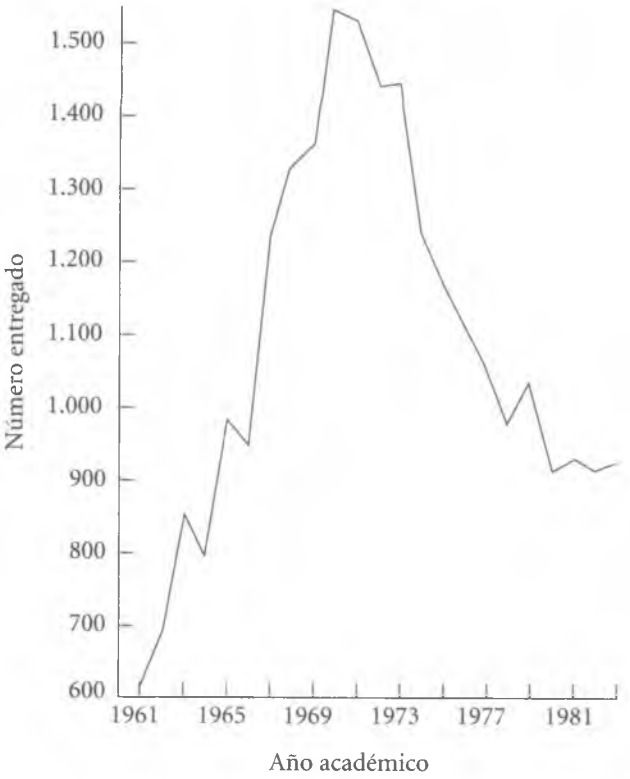


Gráfico 26.1. Grados de física en EEUU, 1961-1983. *Fuente:* Reproducido con permiso de *Physics Through the 1990s: Elementary-Particle Physics.* (©) 1985 por National Academy of Sciences. Cortesía de National Academy Press, Washington, D.C.

co quien empezó a perder confianza en lo que ahora era cada vez más conocido como «curia científica» (*scientific priesthood*). *The New Priesthood* fue el título de un libro de 1965 escrito por Ralph Lapp, un físico nuclear interesado en las consecuencias sociales y éticas de la física. Se oyeron voces disidentes, a menudo fuertes, de entre los propios físicos, muchos de los cuales empezaron a cuestionarse el orden existente de las cosas. Uno de los asuntos principales fue la participación de los físicos, como grupo, en los asuntos sociales. ¿Eran las cuestiones sociales un campo legítimo, si no de la física, de los físicos? Más específicamente, ¿cómo se posicióno la comunidad física estadounidense con respecto a la investigación militar, la carrera armamentística y la guerra de Vietnam? Tales preguntas no eran nuevas, pero alrededor de 1970 eran lanzadas con más frecuencia y con más determinación.

Charles Schwartz, un físico de Berkeley, sugirió en 1968 que la American Physical Society (APS) debería involucrarse en los asuntos públicos, y que la inquietud por la física únicamente como física estaba equivocada. Según la visión de Schwartz, la APS debería hacerse oír en el tema de la guerra de Vietnam en particular, «no porque ten-

gamos una competencia única en esta materia, sino porque compartimos una misma preocupación y responsabilidad con el resto de segmentos de la estructura social estadounidense» (*PT* enero 1968, p. 9). La propuesta provocó mucho debate entre los miembros de la APS, muchos de los cuales apoyaban a Schwartz y demandaban que la APS tomara una posición. Otros, por supuesto, estaban horrorizados de que la APS pudiese convertirse en un instrumento político. Como lo expresó un físico empleado en un laboratorio militar, «no queremos que la APS se degrade cayendo en la misma categoría que los "*hippies*", "extremistas" y otros personajes bajo influencias extranjeras» (*PT* febrero 1968, p. 15). Que la propuesta de Schwartz se rechazara por una sólida mayoría no implicaba que los físicos estadounidenses fueran socialmente indiferentes, estuvieran en general a favor de las políticas gubernamentales en Vietnam, o estuvieran felices por trabajar para el Pentágono. Había una preocupación real y extendida de cómo usar y organizar la ciencia de un modo más humano y socialmente justo. Por ejemplo, en 1969, los físicos fundaron Scientists for Social and Political Action (Científicos por la Acción Social y Política), una organización cuyo objetivo era buscar «un redireccionamiento radical de la tecnología y la ciencia modernas». El secretario de la organización era Martin Perl, un físico de 42 años de Stanford que más tarde ganaría un premio Nobel por su trabajo en física de neutrinos. El porcentaje de físicos que protestó contra la participación en Vietnam era mayor que el de cualquier otra disciplina académica, científicos sociales y académicos humanistas incluidos. Las encuestas indicaban que dos tercios de los físicos académicos más destacados simpatizaban con el activismo estudiantil radical y que cuatro de cada cinco no aprobaban la investigación clasificada en los laboratorios universitarios. La oposición no estuvo limitada a la guerra de Vietnam, sino que incluyó la carrera armamentística y, en concreto, el recientemente propuesto sistema de misil antibalístico (ABM por las siglas en inglés de *anti ballistic missile*). En la reunión de la APS de la primavera de 1969, más de mil físicos firmaron una petición dirigida al presidente Nixon urgiéndole a que parara el sistema ABM y deplorando «el comienzo de una particularmente peligrosa, pero finalmente futil, escalada de armas nucleares cuando nuestra expansiva crisis interna exige una reasignación de los recursos nacionales» (Easlea 1973, p. 311).

La caída en las subvenciones para la física en los años setenta y la nueva conciencia social de muchos físicos estaba enmarcada en los Estados Unidos, pero no estaba limitada a este país. En casi todos los países europeos, los presupuestos gubernamentales para la ciencia en general se estabilizaron y, dentro de los presupuestos, la ciencia física fue una víctima bastante clara, aunque no tanto como en los Estados Unidos. Hubo en esta década un salto de subvenciones y de interés público general y universal desde la física hacia la biología y las ciencias sociales. Difícilmente podría hablarse de una «crisis» en la física europea, la cual, a pesar de los recortes en dinero, realmente no tenía una entidad como «física europea», sino que era física en los distintos países europeos. La fragmentación entre muchas naciones fue quizá el mayor problema en lo que, a pesar de todo, llamaremos física europea. La difícil situación económica alrededor de 1970 hizo que Gran Bretaña y Francia redujeran sus gastos en investigación y desarro-

llo (I+D) y en Gran Bretaña varios grandes centros de física fueran clausurados. Sólo en Alemania Occidental la física experimentó un modesto incremento en apoyo, y este país también fue el único que apoyó tanto al CERN como a su laboratorio de física de altas energías nacional propio (el centro DESY).

Un paso importante hacia un sistema de física europeo más unificado se dio en 1968 con la fundación de la European Physical Society (EPS) o Sociedad Física Europea, con el italiano Gilberto Bernardini como su primer presidente. La idea de fundar tal organización se gestó en una reunión de 1965 de la Sociedad Física Italiana, donde los participantes consensuaron que la participación creciente de la física en los problemas sociales, políticos y éticos necesitaba de una mayor unidad entre los físicos en Europa. La EPS era básicamente una unión u organización-paraguas de sociedades físicas nacionales existentes y de academias científicas. En 1972 incluía organizaciones de veinticuatro países, ocho de la Europa comunista y quince de la Europa no comunista, mientras que como país no europeo, Israel era también miembro. Las organizaciones de la EPS representaban a unos 36.000 miembros, haciendo de la misma la mayor organización profesional de físicos del mundo.

Tradicionalmente, cada uno de los grandes países europeos tenía su propia publicación de física más o menos internacional. Éstas tenían un gran pasado, pero en la era de la posguerra dominada por Estados Unidos, era muy poco seguro que éstas fueran a tener también un gran futuro. La primera revista que fue publicada por entero por la EPS, y en este sentido la primera publicación de física realmente europea, fue *Europhysics Letters,* que empezó en 1986. Incorporó las secciones de comunicaciones pertenecientes originalmente a la italiana *Nuovo Cimento* y al francés *Journal de Physique.* Aunque la nueva publicación aceptaba escritos en inglés, francés, alemán y ruso, nada más empezar todos los artículos estaban escritos en inglés. Se había reconocido durante largo tiempo que el inglés era la lengua internacional de la física y que las publicaciones nacionales en otras lenguas no desempeñaban ningún papel real en la investigación fronteriza de la física. En 1980, un físico destacado que no pudiera hablar y escribir en inglés era una rareza, casi una contradicción en sí misma. Después de 1986, otras publicaciones europeas de física se fusionaron, cerraron o fueron reorganizadas bajo el sistema de publicación de la EPS. La racionalización era indispensable y simplemente había demasiadas, y demasiado poco importantes, publicaciones de física en Europa. La culminación llegó a principios de 1998, cuando dos de las publicaciones más prestigiosas e históricamente importantes, la alemana *Zeitschrift für Physik* y la francesa *Journal de Physique* se fusionaron, metamorfoseándose en la nueva *European Physical Journal.* Modelada siguiendo el patrón de *Physical Review*, la nueva publicación apareció con cinco secciones diferentes. Por supuesto, apareció no sólo en papel, sino también en formato electrónico.

En 1983, la crisis –si es que realmente hubo alguna– en la física de Estados Unidos ya había pasado y el apoyo federal empezó a mostrar un incremento sustancial. El cambio más drástico fue la cantidad de dinero asignado para investigación en defensa. Los presupuestos de Reagan de 1984 pedían un incremento de 6.900 millones de dólares en

I+D federal, con prácticamente todo el incremento relacionado con el Departamento de Defensa. Mientras que la parte de defensa de la inversión federal en I+D fue del 48 por 100 en 1980, en el presupuesto de 1984 era del 67 por 100. Lo que pasó durante los años ochenta fue una remilitarización de la ciencia, con un papel asignado a la física reminiscente de aquél de los años cincuenta –es decir, como una fuente de nueva tecnología de armas y de otros conocimientos militarmente útiles (véase gráfico 20.1)–. La principal razón por la cual se dio este renovado papel en la investigación militar fue la Iniciativa Estratégica de Defensa de Reagan (Strategic Defense Initiative, SDI) o «*Star Wars*» *(Guerra de las Galaxias)*, un programa de investigación tecnológicamente ambicioso de 26.000 millones de dólares dirigido a desarrollar un «escudo nuclear» basado en el láser avanzado y en armas de haces de partículas designadas para destruir los misiles balísticos soviéticos atacantes. La iniciativa causó acalorados debates en la comunidad física, en muchos casos la repetición de muchos debates relacionados con el sistema ABM y la guerra de Vietnam. Aunque muchos laboratorios de física estuvieran subvencionados generosamente como resultado del proyecto SDI, la mayoría de los físicos estadounidenses no estaban entusiasmados por ello. El primer año desde que lo anunciara Reagan, la Union of Concerned Scientists había conseguido el apoyo contra el SDI de unos mil científicos, incluyendo 54 premios Nobel. Argumentaban que el SDI no sólo era tecnológicamente ingenio y económicamente ruinoso, sino que también era «moralmente repugnante». Como en debates anteriores sobre el papel de los físicos en proyectos militares, no existía ningún acuerdo entre ellos. Uno de los premios Nobel que protestaba contra el SDI fue Robert Wilson, quien en 1965 descubrió la radiación cósmica de fondo. Su codescubridor y colaureado, Arno Penzias, declinó firmar el manifiesto de protesta, argumentando que era «más polémica que ciencia».

Esta época de gran agitación política en el mundo de la física incluía una nueva actitud crítica hacia la misma investigación física, tanto en el ámbito cognitivo como en relación a sus prioridades y organización. Los artículos sobre «la crisis de la física» se multiplicaron, tanto en los Estados Unidos como en Europa. Como ejemplo típico de la nueva crítica a tener en cuenta, el de un joven físico británico que en 1974 atacó el sistema de gran ciencia por desembocar en «elitismo, competitividad, subsidio, burocratización, mentalidad de administración de empresas y concentración del poder económico y de toma de decisiones», y esto no era todo, ya que también «asfixiaba la espontaneidad, independencia, originalidad, creatividad, e incluso la objetividad». En la física de altas energías, argumentaba que el sistema había llevado a «una sucesión de modas pasajeras que se han hecho tan populares como los *hula-hops* [...] los físicos más jóvenes se han dado cuenta de que juegan con ventaja si se apuntan a una de estas modas pasajeras tan pronto como sea posible, independientemente de que sea o no fructífero y sin tener en cuenta si realmente creen en ello» (Yaes 1974, p. 463). Algunos de estos temas fueron destacados por Michael Moravcsik, un teórico estadounidense, en un artículo titulado, cómo no, «La crisis de la física de partículas». Moravcsik creía que la física de partículas elementales estaba totalmente equivocada y que parte de la culpa debería encontrarse en una mezcla de factores sociológicos y metodológicos. El confor-

mismo reinaba, propugnaba Moravcsik, siendo el peor síntoma «el *fadism*, esto es, la concentración de esfuerzos alrededor de un pequeño número de temas y enfoques de moda, los cuales están más determinados por las cualidades personales de algunos físicos influyentes que por los criterios usuales de mérito científico» (Moravcsik 1977, p. 92). Su crítica fue contestada por un representante del *statu quo* de la física de partículas, el teórico británico John Polkinghorne. De modo sintomático, quizá, en los años ochenta Moravcsik derivó a estudios de ciencia del Tercer Mundo y Polkinghorne eligió la teología como vocación en lugar de la física. Tanto social como cognitivamente, la física de altas energías estaba en un estado fluctuante en los años setenta.

Las objeciones contra el sistema científico declaradas por físicos estadounidenses estaban casi por completo enfocadas hacia el mal uso de la física, la organización de la física y la carencia de responsabilidad social. Fue una oposición radical, pero sólo relativamente: a pesar de toda la retórica, no se cuestionaban asunciones fundamentales, como el valor de la ciencia o los métodos aceptados de investigación científica. Más allá de esto, era una crítica más moral que ideológica, basada en un análisis político explícito. El fuerte compromiso de muchos científicos europeos con el marxismo no era un tema que se encontrara en el debate estadounidense, donde la «marxología» estaba prácticamente ausente. Los físicos europeos de izquierdas tendían a estar más directamente inspirados por el marxismo y en algunos casos demandaban una transformación más radical de la ciencia. Por mencionar sólo un ejemplo, el físico francés Jean-Marc Lévy-Leblond argumentaba que la ideología era inseparable de la ciencia y que parte de la ideología de la física moderna era la jerarquización epistemológica de la ciencia que adscribía una posición de privilegio a la física de partículas «fundamental». (Una opinión similar fue defendida por Philip Anderson y otros en los Estados Unidos, pero sin los trasfondos ideológicos.) Otra parte de la ideología de la ciencia fue la «tradicionalmente elitista y meritocrática concepción de la ciencia [...] [y] la ideología de expertos y competitividad». ¿Cómo es, se preguntaba Lévy-Leblond y sus almas gemelas, que cuanto más se involucra una ciencia en la producción diaria y la vida cotidiana, más pierde su naturaleza «científica»? La ciencia, continuó en un clásico argumento marxista, «se ha ido separando progresivamente de sus orígenes y ha cesado de mostrar sus frutos e inspiración a partir de la masa de sabiduría popular»; como ejemplo, mencionaba la localización de agua (como ejemplo de conocimiento popular tradicional) y sugirió que este fenómeno debería ser investigado con la misma seriedad «como un detalle concreto del corte transversal de la colisión protón-protón ante altas energías». Y, aun así, incluso el radical Lévy-Leblond dudaba si luchar por una física marxista específica. Admitió que la física de altas energías estaba realizada esencialmente del mismo modo en los Estados Unidos y en la Unión Soviética, e incluso probablemente en la China maoísta, y que «no es fácil cambiar radicalmente un punto de vista sobre el contenido interno de ninguna ciencia» (Lévy-Leblond 1976, pp. 166-169). Otros profetas de los años sesenta y setenta tuvieron menos dudas en sus peticiones de modos de ciencia que diferían fundamentalmente de la despreciada «ciencia capitalista» cuyo arquetipo era la física de altas energías.

Una revuelta contra la ciencia

La crítica contra la ciencia en un nivel fundamental, en ocasiones incluyendo el rechazo de la ciencia como tal, no fue un invento de los años sesenta. A través de su historia, la ciencia ha sido atacada continuamente y gran parte de la crítica que se hizo tan visible en los años sesenta y setenta tenía sus raíces en el siglo XIX o incluso aun antes. De acuerdo con una corriente crítica, típicamente encontrada en los escritos del cristalógrafo marxista británico John D. Bernal en los años treinta y cuarenta, la ciencia está socialmente organizada de manera errónea y se usa para unos propósitos equivocados, por tanto debe ser cambiada. Aunque Bernal y sus camaradas en el movimiento de «científicos rojos» de los años treinta no rechazaban los valores de la ciencia en sí, simplemente intentaban conseguir cambios profundos en la práctica social de la ciencia. Cambiando la sociedad –desde una estructura capitalista a una basada en el socialismo– la ciencia se curaría de su enfermedad. Pero había otras versiones más antiguas de crítica de la ciencia que tomaron una postura más radical, cuya consecuencia fue la negación de la ciencia, más que una redefinición de la misma. La tradición romántica o utópica, y a menudo antiintelectual, enfatizaba el conocimiento de la naturaleza aprehendido subjetiva e intuitivamente y se oponía a los cánones de objetividad característicos de la ciencia común. El vitalismo, el antirracionalismo y versiones de la *Lebensphilosophie* que se remontaban a alrededor de 1800, si no antes, experimentaron un renacimiento en los años setenta.

Bebiendo de varias fuentes, algunas de ellas bastante incompatibles, emergió a partir de finales de los sesenta una nueva y vigorosa forma de crítica científica, la cual, en su forma más extrema, pedía la abolición de la ciencia tal como se conocía. Parte de la crítica estaba inspirada en las visiones de un grupo de sociólogos y filósofos principalmente europeos, incluyendo a Herbert Marcuse en los Estados Unidos, Jürgen Habermas en Alemania y Louis Althusser y André Gorz en Francia. En su influyente *El hombre unidimensional*, un clásico sobre la revuelta estudiantil, el alemán-americano Marcuse argumentaba que la ciencia occidental estaba dirigida inherentemente hacia la dominación de la naturaleza, así como de las personas. De acuerdo con Marcuse y otros gurús filosóficos de la época, la esencia de la ciencia era la explotación. La naturaleza en su estado original o «anárquico» había sido mutilada –violada– por la defensa de las abstracciones científicas del exterior; el conocimiento científico de la naturaleza por tanto se había convertido en idéntico a la dominación y la explotación. Además, la sociedad tecnológica represiva se basaba en las ciencias físicas, y estas ciencias eran por tanto responsables de la represión y deshumanización que serían características de la sociedad moderna. Marcuse reclamaba que «el carácter matemático de la ciencia moderna determinaba el rango y tamaño de su creatividad, y deja a las cualidades no cuantificables de *humanitas* fuera del dominio de la ciencia exacta» (Schweber 1994b, p. 144). Que Marcuse y los otros gurús del periodo supieran poco sobre ciencia e incluso menos sobre física es cierto, pero históricamente irrelevante. Sus visiones fueron aceptadas por gran parte de las generaciones jóvenes, que rechazaban el proyecto científico y aceptaban la descripción de los físicos como máquinas desalmadas al servicio de los manda-

tarios militares e industriales. No tiene mérito destacar que eran marcados, aunque al mismo tiempo no percibidos, los paralelismos entre la anticiencia y los movimientos radical-científicos de los setenta y la actitud hacia la ciencia que floreció en Alemania a principios de los años veinte bajo el liderazgo espiritual de Oswald Spengler (véase capítulo 10). De modo similar, había paralelismos con la situación en la Unión Soviética, el Tercer Reich y el resto del mundo a finales de los años treinta. En 1942, el sociólogo Robert K. Merton escribió sobre «un asalto frontal contra la autonomía de la ciencia» y advirtió contra lo que veía como un antiintelectualismo amenazante. «La revuelta de la ciencia», escribió, «que [hasta recientemente] parecía tan improbable ya que implicaba sólo al tímido académico que ponderaría todas las contingencias, no importa cuán remotas, ahora ha sido forzada a la atención tanto del científico como del gran público» (Merton 1973, p. 267).

Perteneciente a una tradición bastante diferente a la de los críticos sociales europeos, el análisis de Thomas Kuhn de 1962 de la evolución histórica de la ciencia inintencionadamente resultó ser otra fuente para el malestar hacia la ciencia. Con un doctorado en física bajo la dirección de John Slater, Kuhn no tenía ninguna intención de unirse a la tendencia anticiencia. En su *best seller La estructura de las revoluciones científicas*, Kuhn argumentaba contra la visión positivista de la ciencia, sugiriendo que no existe el progreso científico a lo largo de periodos de cambio revolucionario, e insinuó que la ciencia se desarrolla en una manera no racional. El mensaje, le pareció a muchos de sus jóvenes lectores, era que la física no era más científica que la psicología, la historia del arte, o la crítica literaria. Tampoco debía la astronomía moderna ser más confiable que la astrología. Desarrollando algunos de los temas de Kuhn, el filósofo austriaco-americano Paul Feyerabend fue más allá y atacó la ciencia y al método científico como nociones puramente ideológicas que iban de la mano de la religión, los mitos y la propaganda; sólo la ciencia, al contrario que la religión y los mitos, había llegado a ser el dogma predominante de los tiempos modernos, ejecutando una dictadura mental pareja a la de la Iglesia católica romana en la Edad Media. Feyerabend argumentaba a favor de la abolición de la instrucción obligatoria de la ciencia en las escuelas y de cualquier tipo de apoyo gubernamental de las actividades científicas. «¿Qué tiene de grandioso la ciencia?», se preguntaba. «¿Qué hace a la ciencia moderna preferible a la ciencia de los aristotélicos o a la cosmología de los Hopi?» (Feyerabend 1978, p. 73). Según Feyerabend, absolutamente nada.

Los trabajos de Kuhn y Feyerabend conformaron el contexto de otros estudios históricos, filosóficos y sociológicos de la ciencia, siendo la última moda conocida como el programa de sociología del conocimiento científico o constructivismo social. Los sociólogos constructivistas de los años ochenta y noventa negaban que la cosmovisión científica estuviera basada en la naturaleza y que, por tanto, debiera dársele mayor prioridad que a cualquier otra cosmovisión. La ciencia, decían, es básicamente una construcción social y cultural fabricada a través de negociaciones, decisiones políticas, trucos retóricos y poder social. Sabiendo que la verdad y la falsedad son siempre relativas a un marco local dado, las creencias de los científicos sobre la naturaleza no son

inherentemente superiores a aquellas de las de ningún otro grupo. En un libro sobre la historia de la física de altas energías moderna, el autor, un físico joven convertido en sociólogo, concluyó, «El mundo de la HEP [física de altas energías] es un producto cultural [...] no hay ninguna obligación para cualquiera que quiera presentar una visión del mundo de tomar en cuenta lo que tiene que decir la ciencia del siglo XX» (Pickering 1984a, p. 406). Tales visiones, populares en grandes secciones del mundo académico, no eran lo que la mayoría de los físicos gusta de escuchar. Los constructivistas sociales habían sido acusados de contribuir a una atmósfera de «mayor superstición» y a un renacer del odio hacia la ciencia.

¿Qué tiene todo esto que ver con la física? De forma directa, muy poco. Las visiones de Feyerabend y Marcuse no eran lo más debatido en los laboratorios de física, pero de manera indirecta, la crítica de la ciencia y el malestar general hacia la ciencia que resultó después de alrededor de 1970 fue también importante para la física. Como ciencia dura y «masculina» con una (merecida) reputación por sus cercanas conexiones con las aplicaciones militares, la física se vio atacada más que la mayoría de las demás ciencias. Muchos estudiantes brillantes decidieron que los estudios en ciencias sociales o quizá en ciencias biológicas y medioambientales eran más de su gusto. En general, la popularidad de la física entre los estudiantes cayó estrepitosamente.

Había otras formas de disentir de la física establecida que subiéndose al popular carro relativista o diciendo que la física es una expresión de los modos de pensamiento masculinos y capitalistas. Fritjof Capra, un teórico de partículas estadounidense, creyó que había encontrado una conexión profunda entre la teoría cuántica moderna y expresiones de misticismo oriental, tales como el budismo Zen. Su *Tao de la física*, publicado por vez primera en 1975, se hizo inmensamente popular porque casó muy bien con el espíritu de la década. Fue continuado enseguida por una corriente de otros trabajos del mismo dudoso género. El proyecto de Capra era de algún modo el opuesto absoluto al de los críticos de la ciencia que acusaban a la física de ser una empresa desalmada y materialista. Según Capra, las ideas de la física cuántica eran exactamente las mismas que aquellas alcanzadas mucho antes por los místicos del este a través de la meditación y la intuición. La idea común incluía que la física era básicamente subjetiva, un reflejo de la mente humana más que una descripción de una naturaleza independiente compuesta de partículas y campos. Además, Capra encontró en la teoría de matriz *S* «democrática» el paralelismo más convincente con el misticismo oriental. El que la teoría de matriz *S* hubiera sido abandonada por la inmensa mayoría de los físicos era un hecho que parecía no preocupar al autor, siendo el abandono de la teoría probablemente desconocido para la mayoría de sus lectores. El *Tao de la física* fue el representante de una tendencia conectada con la contracultura que no rechazaba a la física como tal, sino que sugería interpretaciones alternativas y extrapolaciones que para muchos lectores eran mucho más atractivas que las versiones fidedignas. La alternativa de David Bohm a la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica tuvo sus comienzos muchos años antes de los setenta, pero fue sólo con el nuevo clima cultural que desarrolló sus ideas en una dirección consonante con el misticismo y la holística

que caracterizaron al movimiento «*new age*». Las ideas de Bohm de un «orden implicado» le convirtieron en un personaje de culto en amplios círculos, pero no impactaron de ningún modo en la física predominante.

¿El final de la física?

«¿Se vislumbra el final de la física teórica?» fue el título del discurso inaugural de Stephen Hawking cuando en 1980 asumió la prestigiosa Cátedra Lucasiana de matemáticas en la Universidad de Cambridge. Hawking consideró como una posibilidad realista que la física teórica sin duda pudiera terminar en un futuro no demasiado distante, posiblemente tan pronto como en el cambio de siglo. Pero ¿qué quiere decir que la física, la ciencia, llega a su final? Según Hawking, significaba «que podríamos tener una teoría completa, consistente y unificada de las interacciones físicas que podrían describir todas las observaciones posibles». Por el reciente progreso realizado en física fundamental, sintió que «había algunas bases para el optimismo cauteloso por el que podamos ver una teoría completa a lo largo de la vida de algunos presentes aquí» (Crease y Mann 1986, p. 410). Merecen destacarse dos puntos: el primero, que Hawking entendió la expresión «final de la física teórica» como el establecimiento de una teoría unificada y completa que abarcara, en principio, todas las teorías especiales. Segundo, que Hawking era optimista con relación a que se encontrara dicha teoría, o sea, que pensaba que sería algo bueno. En los años ochenta y noventa, el tema del fin de la física se debatió ampliamente y fue la base de una industria menor de publicaciones. Lejos de ser un síntoma de crisis, la popularidad del tema reflejó un sentido de progreso que se dio en los intentos para unificar las leyes básicas de la física. Después de todo, como dirían muchos físicos, el fin último de la física fundamental es producir una teoría final o completa y después, de alguna forma, suicidarse. Habiendo digerido esta teoría final del futuro, no quedaría nada más que hacer, al menos nada de interés fundamental.

Hawking era plenamente consciente de que el tema del fin de la física contaba con una historia larga. Relatamos en el capítulo 1 cómo en la década de 1890, Michelson profetizó el fin de la física, aunque lo que tenía en mente no era una gran teoría unificada. Siguiendo los tempranos triunfos de la mecánica cuántica, y especialmente la formulación relativista especial de la mecánica cuántica en 1928, varios físicos sugirieron que la física estaba aproximándose a un estado de plenitud. El optimismo era enorme y prevaleció un sentimiento general de que «la física estaba prácticamente terminada», como dijo Peierls. El sentimiento fue expresado y hecho famoso por Dirac en un artículo de 1929, «La teoría general de la mecánica cuántica ahora está casi completa», escribió; «Las leyes físicas subyacentes necesarias para la teoría matemática de gran parte de la física y toda la química son por tanto completamente conocidas, y la dificultad es sólo que la aplicación exacta de estas leyes deriva a ecuaciones demasiado complicadas como para ser resolubles» (Kragh 1990, p. 267).

Pronto se vio que el optimismo de Dirac era infundado y que la mecánica cuántica relativista en realidad dio paso a toda una nueva serie de problemas. La visión de

Dirac de la teoría final era, como la de Hawking, reduccionista. Se esperaba que una teoría verdaderamente completa, en la forma de un grupo de ecuaciones, explicara todos los fenómenos de una manera deductiva; en este sentido, los fenómenos podrían ser reducidos a instancias especiales de la teoría final. El ideal de reduccionismo de la teoría pudo ser encontrado muchos años antes de Dirac y fue, por ejemplo, el fundamento metodológico de la teoría de campo unificada de Gustav Mie de 1912. Einstein también suscribió la visión de que el fin último de la física es «llegar a aquellas leyes fundamentales universales a partir de las cuales el cosmos puede ser recreado por pura deducción», como escribió en 1918 en un discurso dado con ocasión del sexagésimo cumpleaños de Planck.

Después del optimismo prematuro de 1928-1930, hubo que esperar mucho tiempo hasta que los físicos retomaran el debate del fin de la física. Mientras, otros físicos enfocaban la cuestión de una manera distinta. Las teorías deductivas de Milne y Eddington, desarrolladas en los años treinta y cuarenta, prometían un conocimiento apriorístico del universo entero, que incluiría las «explicaciones» de las constantes naturales, tales como la constante de estructura fina. La «teoría fundamental» inacabada de Eddington fue un intento ambicioso de aportar una teoría final y difería de los intentos previos únicamente en que era menos ortodoxa y más oscura. En un artículo de 1949 titulado «¿Habrá física mañana?», George Gamow se preguntaba si el futuro de la física «se nos aparecería como horizontes siempre en expansión, ofreciendo posibilidades ilimitadas para seguir explorando, o de otro modo, ¿convergería la física hacia «un sistema completo y autoconsistente de conocimiento físico fundamental con toda la base concienzudamente explorada y sin descubrimientos asombrosos?» (*PT* enero 1949, p. 17). Gamow argumentó que la física fundamental podría, en principio, estar cimentada en cuatro constantes de la naturaleza (eligió *c, h, k* y una longitud elemental) y sugirió que si pasaba esto, la física habría llegado a su fin:

> En caso de que todas las leyes que gobiernan los fenómenos físicos se descubran finalmente, y todas las constantes empíricas que ocurren en estas leyes se expresen finalmente a través de cuatro constantes independientes básicas, será cuando podamos decir que la ciencia ha llegado a su fin, que no quedará emoción en exploraciones posteriores y que todo lo que le queda a un físico es, bien un trabajo tedioso en detalles menores, bien el estudio autoeducativo y la adoración de la magnificencia del sistema completo. ¡En este estadio la ciencia física entrará desde la época de Colón y Magallanes hasta la época de la revista *National Geographic!*

Gamow no requería una teoría fundamental unificada a partir de la cual todas las demás teorías pudiesen ser deducidas, sino que las leyes fundamentales, estuvieran conectadas o no, fuesen conocidas. En el mismo año en que Gamow publicó su artículo, Einstein expresó en sus *Notas autobiográficas* su profunda creencia de que «la naturaleza está constituida de tal modo que es posible de manera lógica formular leyes tan fuertemente determinadas que dentro de las mismas sólo se den constantes completa

y racionalmente determinadas (no constantes, por tanto, cuyos valores numéricos puedan ser cambiados sin destruir la teoría)» (Schilpp 1949, p. 63).

Richard Feynman fue otro de los científicos que creía que el conocimiento científico al nivel más fundamental era finito, y que llegaría un día en que la física a este nivel terminaría. «Esto de que siempre vayamos a descubrir más y más leyes nuevas no puede continuar siempre», escribió en 1965. Como Gamow, usó la metáfora de las exploraciones geográficas para dejar claro su punto de vista: «Tenemos mucha suerte de vivir en una era en la cual todavía realizamos descubrimientos. Es como el descubrimiento de América –sólo la descubres una vez–. La era en que vivimos es la era en la que estamos descubriendo las leyes fundamentales de la naturaleza, y ese día nunca volverá. [...] Habrá [en el futuro] una degeneración de ideas, justo como la degeneración que los grandes exploradores sienten que ocurre cuando los turistas empiezan a moverse en un territorio» (Feynman 1992, p. 172). Aunque las ideas de Gamow, Einstein y Feynman no se referían a una teoría unificada, sus concepciones respecto al final de la física eran bastante similares a las que se hicieron tan populares cerca del final de siglo. Steven Weinberg era uno de los muchos teóricos de los años noventa que creía en una teoría final a partir de la cual fluirían todas las líneas de explicación. La teoría no sería inevitable lógicamente, sino que estaría aislada lógicamente, en otras palabras, «cada constante de la naturaleza podría ser calculada a partir de primeros principios [...] Conoceríamos a partir de la base de matemática y lógica puras por qué la verdad no es ligeramente diferente» (Weinberg 1993, p. 237). Cualquiera que fuera la forma precisa de la teoría final, Weinberg tenía confianza en que sería mecánico-cuántica, una postura compartida por casi todos los unificacionistas.

La mayoría de las visiones de teóricos de partículas de una teoría final son reduccionistas y están basadas en una visión jerárquica de las ciencias que ha sido puesta en duda por muchos filósofos, así como por algunos físicos. La crítica de Philip Anderson de los años setenta de la reclamada superioridad epistemológica de la física de altas energías incluía la observación: «La habilidad para reducir todo a simples leyes fundamentales no implica la habilidad para empezar a partir de aquellas leyes y reconstruir el universo. De hecho, cuanto más nos hablan los físicos de partículas elementales sobre la naturaleza de las leyes fundamentales, menor relevancia parece que tiene con respecto a los muy reales problemas del resto de la ciencia, y mucha menor con respecto a aquellos de la sociedad» (Anderson 1972, p. 393; véase también el capítulo 21). Anderson destacó que son las soluciones a las ecuaciones, no las ecuaciones por sí solas, las que se relacionan con fenómenos físicos y que las soluciones son específicas a los diferentes niveles de la naturaleza. Aunque los átomos y las moléculas se constituyan a partir de quarks y leptones y éstos obedezcan a las leyes de física de partículas elementales, física atómica, química y física del estado sólido no pueden reducirse a la física de partículas elementales. Si este nivel de «emergencia» es aceptado, no hay razón para esperar que una teoría final sea una teoría «de todo». De ahí que la teoría final no marcará el final de la física, solamente el final de la física fundamental de altas energías.

«El final de la física» se puede entender en un sentido que no tiene nada que ver con las teorías finales, unificadas. La física, tal como la conocemos, puede terminar simplemente porque las personas pierdan interés en ella o porque los gobiernos e instituciones subvencionadoras decidan que no hay necesidad de apoyar la investigación en física básica en una escala sustancial. Tales sombríos avisos no son nuevos, pero al llegar el siglo a su final, eran oídos con más frecuencia y más alto que antes. Y estos avisos fueron expresados por físicos que estaban preocupados por otro periodo de crisis, acentuado por la carencia de descubrimientos realmente emocionantes durantes más de dos décadas. Para algunos, parecía que la crisis de los años setenta había vuelto y que factores internos y externos conspiraba para que la vida de los físicos fuera más dura. Con la disolución de la Unión Soviética en 1990, la situación se hizo particularmente difícil para los físicos en el este de Europa y Rusia. No servía de mucho consuelo que en el mundo occidental estuvieran mucho mejor parados que sus colegas orientales. Leo Kadanoff, un teórico destacado de materia condensada estadounidense destacó en 1992 que la «ciencia está poco valorada» y que las actitudes anticientíficas de los setenta eran aún políticamente importantes. «Estamos acercándonos velozmente a una situación en la que nadie se creerá nada de lo que digamos en cualquier materia relativa a nuestro propio interés. Nada de lo que hagamos parece que pueda detener nuestra caída en número, apoyo o valor social [...] Hoy cuando el público piensa en los productos de la ciencia, es probable pensar en problemas medioambientales, informes "científicos" despreocupados o deshonestos, hurras en Livermore para que haya "nucleares para siempre" y una gran cantidad de ruido autoproducido en todos los temas, desde el calentamiento global hasta "la cara de Dios"». Aunque la situación era seria, según la visión de Kadanoff, no era un preludio del final de la ciencia, pero sí que podría ser un preludio a un papel bastante reducido de la ciencia en el siglo XXI, y de la física en particular. «En las últimas décadas, la ciencia ha sido muy considerada y ha sido el centro del interés y la preocupación sociales. No deberíamos sorprendernos si esta anomalía desaparece. Todos estaremos desencantados y heridos por esta previsible evolución. Pero si podemos mirar con distancia y ver la situación con algo de perspectiva, todos los que estamos en la ciencia podemos decir que hemos tenido suerte de ser parte de una empresa que ha merecido la pena» (*PT* octubre 1992, p. 10).

CAPÍTULO 27

Unificaciones y especulaciones

El problema de la unidad

En 1918 se sabía que la teoría de Einstein de la relatividad general describía la gravitación y la teoría de fenómenos electromagnéticos de Maxwell-Lorentz. Éstas eran las dos fuerzas fundamentales reconocidas en la época, por lo que era natural tratar de unificar ambas teorías. Las teorías de campo de Weyl (1918) y de Eddington (1921) estaban entre las ideas de unificación más tempranas pertenecientes al nuevo programa de geometrización de la física. La aproximación de Theodor Kaluza, un matemático de la Universidad de Köninsberg, era diferente de la seguida por Weyl, pero el objetivo de Kaluza era el mismo. En un trabajo de 1921, Kaluza atacó el programa de proveer «una *descripción* completamente *unificada del mundo* [...] [la cual es] una de las grandes ambiciones del espíritu humano» (Vizgin 1994, p. 151; cursiva en el original). Kaluza postuló por un espacio riemaniano de cinco dimensiones, añadiendo a las cuatro dimensiones del espacio-tiempo usual una hipotética dimensión extra del mundo. El significado físico de la quinta dimensión no estaba claro, pero Kaluza descubrió que, en esta dimensión, la trayectoria de una partícula era siempre una curva cerrada. Además, su teoría de campo de cinco dimensiones, basada en catorce potenciales (diez gravitacionales y cuatro electrodinámicas), incluía tanto a la teoría general relativista de la gravitación como a las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo. Einstein encontró atractiva la teoría al principio, pero pronto tanto él como la mayoría de los otros especialistas en el campo llegaron a la conclusión de que no tenía conexión con el mundo físico. Kaluza y los primeros unificacionistas no incorporaron el mundo cuántico a sus programas y sólo comprendieron que de alguna manera la teoría cuántica cambiaría el juego de la unificación. Ya en 1916, Einstein comentó en su artículo sobre ondas gravitacionales que «la teoría cuántica deberá modificar no sólo la electrodinámica de Maxwell sino también la nueva teoría de gravitación». De modo similar, Kaluza reconoció que «cualquier hipótesis que declara tener una significación uni-

versal está amenazada por la esfinge de la física moderna: la teoría cuántica» (Vizgin 1994, p. 158). En cualquier caso, ni Einstein ni Kaluza hicieron uso de la teoría cuántica en sus teorías unitarias.

Una ampliación de la teoría de cinco dimensiones de Kaluza para cubrir fenómenos cuánticos también fue sugerida por Oskar Klein en 1926, poco después de la aparición de la mecánica ondulatoria de Schrödinger. En la teoría de Klein, la quinta coordenada no era observable pero no por ello dejaba de ser físicamente significativa –en otras palabras, una magnitud análoga a la carga eléctrica–. En este sentido, esperaba que fuera capaz de explicar la atomicidad de la electricidad como una ley cuántica y también explicar la construcción básica de bloques de materia, el electrón y el protón. Al asumir que el espacio de cinco dimensiones estaba cerrado en la dirección de la quinta coordenada, con un periodo definido λ, Klein argumentaba que «el origen de la cuántica de Planck puede ser buscado en esta periodicidad en la quinta dimensión», esto es, quería aceptar el cuanto de acción más que como una constante irreducible de la naturaleza. En cuanto al periodo, sugirió $\lambda = hc(2\kappa)^{1/2}/e$, siendo e la carga numérica del electrón y κ la constante de gravitación de Einstein. «El pequeño valor de esta longitud», que es $\lambda = 10^{-30}$ m, «puede explicar la no aparición de la quinta dimensión en experimentos usuales como resultado de obtener la media de la quinta dimensión» escribió Klein en *Nature* en octubre de 1926. La teoría de Kaluza-Klein de las cinco dimensiones atrajo un interés considerable a finales de los años veinte, y fue estudiada por muchos teóricos, incluyendo a Vladimir Fock en la Unión Soviética, Léon Rosenfeld en Bélgica, Louis de Broglie en Francia y Dirk Struik en los Estados Unidos. Desde alrededor de 1930, en cualquier caso, muchos físicos perdieron interés en la teoría, que parecía lejos de ser probada físicamente y aplicada. Como tantos candidatos para ser una teoría unificada, se mantuvo en la periferia de la física durante muchos años, al ser considerada como especulativa y sólo de interés matemático.

Mucho después, sin embargo, la teoría Kaluza-Klein experimentó un renacimiento. A mitad de los años setenta, Joël Scherk, Edward Witten y otros reconsideraron la teoría en conexión con las nuevas teorías de supergravedad que ampliaron la teoría general de la relatividad de Einstein. La supergravedad, una versión supersimétrica de la relatividad general, fue inventada en 1976 por Daniel Freedman, Peter van Nieuwenhuizen y otros. Sobre 1980, la teoría multidimensional de Kaluza-Klein era una zona caliente en la física teórica, interactuando y compitiendo con nuevas ideas de la gravedad cuántica, tales como la teoría de las supercuerdas. Mientras que Kaluza y Klein podían integrar las cinco dimensiones, la más popular de las teorías renacidas de Kaluza-Klein hacía lo posible por obtener la unificación a través de un espacio de once dimensiones. En cualquier caso, aunque la versión de la supergravedad de la teoría de Kaluza-Klein se consideró como matemáticamente fascinante, predijo partículas que no eran similares a aquellas conocidas en la naturaleza. Después de mucho trabajo y considerable entusiasmo, se vio que la teoría de once dimensiones de Kaluza-Klein no funcionaba mejor que el modelo original de los años veinte.

El difícil problema de armonizar la mecánica cuántica y la relatividad general fue atacado desde muchos ángulos distintos. Un modo fueron los intentos de cuantizar el campo gravitatorio, típicamente de algún modo similar a aquel de la cuantización del campo electromagnético en la teoría cuántica de campos. Con la teoría electrodinámica cuántica de Heisenberg-Pauli de 1929, pareció durante un tiempo que mientras que los campos gravitacionales débiles podrían ser tratados de la misma manera que los campos electromagnéticos. Heisenberg y Pauli mantuvieron, de modo hiperoptimista, que una cuantización del campo gravitacional «podría ser llevado a cabo sin nuevas dificultades a través de un formalismo totalmente análogo a este aplicado aquí [su artículo de 1929]». Pronto se vio que el problema era mucho más difícil que lo anticipado. El primero que aplicó los nuevos procedimientos de cuantización de campo a la gravitación fue Rosenfeld, quien en 1930 estudió lo que llamó los «cuantos gravitacionales». Un intento más completo y ambicioso de integrar la mecánica cuántica con la relatividad general fue realizado por el físico ruso Matvei Bronstein en trabajos entre 1933 y 1936. Bronstein debatió la «física *cGh*» unificada y examinó los límites cuánticos de la teoría general de relatividad en lo que más tarde sería llamada la longitud de Planck $l_P = (hG/c^3)^{1/2} = \sim 10^{-35}$ m. Sin embargo, los trabajos de Bronstein atrajeron muy poco la atención en un tiempo en el que el interés de la física estaba centrado en el núcleo atómico, la radiación cósmica y en los problemas de la electrodinámica cuántica. Se tuvo que esperar a los años cincuenta, con el interés renovado en la relatividad general, cuando el problema de la cuantización del campo gravitacional fue elevado por más que unos pocos físicos. Y fue sólo entonces cuando la escala de Planck, incluyendo una masa de Planck –$(ch/G)^{1/2}$ o unos 10^{-5} gramos– fueron debatidas explícitamente en la literatura física, al principio por Klein y John Wheeler. Dirac, Peter Bergamann y otros trabajaron en los llamados nuevos métodos canónicos de gravitación cuantizada, una aproximación que culminó en 1958, cuando Dirac obtuvo con éxito la teoría general de la relatividad en la forma hamiltoniana. Con la teoría en esta forma, era relativamente fácil aplicar las reglas de la cuantización a los campos gravitacionales. Dirac sugirió en 1959 que los cuantos resultantes de la gravitación se llamaran «gravitones», un nombre que inmediatamente se acuñó como parte del vocabulario de los físicos. Aparentemente no estaba al tanto que el nombre gravitavitón para un cuanto de energía gravitatoria ya había sido presentado por Dmitri Blokhintsev y F. Galperin en 1934, en un artículo publicado solamente en ruso.

Teorías de gran unificación

En 1973, la teoría electrodébil y la nueva cromodinámica cuántica (CDC) estaban en su lugar y eran ampliamente aceptadas como buenas teorías para las interacciones débiles, electromagnéticas y fuertes (capítulo 22). La simetría asociada con la teoría electrodébil de Weinberg-Salam era conocida como una simetría SU(2) × U(1) rota, la de CDC una simetría SU(3). La teoría de gauge SU(2) × U(1) fue la primera unificación con éxito en la física de partículas moderna, pero no fue una teoría realmente uni-

ficada en el sentido fidedigno de la palabra. Por ejemplo, operaba con dos interacciones diferentes y constantes de emparejamiento asociadas. La ampliación de la teoría electrodébil para cubrir interacciones fuertes también estaba directamente conseguida al ampliar $SU(2) \times U(1)$ en $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. En este caso, la teoría jugaría tanto con leptones como con quarks, pero aun así estaría basada en diferentes grupos, distintas constantes de emparejamiento y diferentes partículas elementales. A principios de 1974 Howard Georgi y Sheldon Glashow en la Universidad de Harvard sugirieron en un artículo programático que una unificación adecuada de las tres fuerzas de la naturaleza debería estar basada en un grupo simple conocido como el SU(5), el cual era diferente de una simple combinación de los grupos de SU(3) y $SU(2) \times U(1)$. «Presentamos una serie de hipótesis y especulaciones» escribieron ambos teóricos, «que llevaban indefectiblemente a la conclusión de que SU(5) es el grupo de gauge universal, que todas las fuerzas de partículas elementales (fuertes, débiles y electromagnéticas) son manifestaciones diferentes de la misma interacción fundamental que involucra una sola fuerza de acoplamiento, la constante de estructura fina» (Zee 1982, p. 46).

En este primer ejemplo de una gran teoría unificada, Georgi y Glashow afirmaban que en la descripción del SU(5), las tres constantes de acoplamiento se fundirían en una sola a muy altas energías o, lo que llega al mismo extremo, a distancias extremadamente pequeñas. Al contrario de muchas otras teorías unificadas, la teoría SU(5) se relacionaba directamente con la física empírica. Según Georgi y Glashow, una cierta cantidad experimentalmente determinable en la teoría electrodébil (el parámetro Sen $^2\theta_w$, siendo θ_w la llamada mezcla o ángulo de Weinberg) se podría calcular como 3/8. En la teoría electrodébil de Weinberg-Salam la cuantización podría ser determinada sólo mediante experimento. Otro hecho atractivo de la teoría SU(5) es que explicaba la igualdad de la carga numérica de protones y electrones, esto es, por qué los átomos de hidrógeno son neutros. Hasta la llegada de SU(5) la igualdad de carga se había considerado simplemente un hecho accidental de la naturaleza, sin relación alguna con la teoría fundamental. A principios de los sesenta, respondiendo a una sugerencia de Hermann Bondi y Raymond Lyttleton de que podía haber una pequeña pero cosmológicamente importante diferencia de carga, los experimentos probaron que la diferencia de carga, de existir, era menor que 1 entre 10^{20}. Con la teoría de Georgi-Glashow, había ahora razones teóricas para pensar que las cargas eran exactamente iguales. De modo más sorprendente aun, la teoría predecía que el protón era inestable. Éste también podría ser el caso del neutrón, incluso estando en núcleos atómicos no radiactivos. La teoría unificada SU(5) incorporó no sólo los quarks, los leptones y las partículas de intercambio electrodébiles (el fotón y los bosones pesados *W* y *Z*), sino también un grupo de bosones vectoriales coloreados superpesados conocidos como partículas *X*. Éstos requerían cargas eléctricas fraccionales, 1/3 ó 4/3 de ambos signos. Curiosamente, las nuevas partículas causarían transiciones entre los quarks y leptones, un tipo de reacción no permitida por teorías anteriores. Como ejemplo, Georgi y Glashow mencionaron el proceso por el cual un protón se desintegra en un positrón y en un pión neutro, a través de un mecanismo donde uno de los quark arriba (*up-quark*)

del protón transmite una partícula X a su quark abajo (*down-quark*). Ésta era sin duda una predicción sorprendente y una de las razones para el comentario de Georgi y Galshow: «Nuestra hipótesis puede estar equivocada, y nuestras especulaciones pueden no tener utilidad alguna, pero la simplicidad y unicidad de nuestra idea son razones suficientes para que sea tomada en serio».

La aproximación Georgi-Glashow fue desarrollada rápidamente por Georgi, Helen Quinn y Steven Weinberg, quienes, unos cuantos meses más tarde, aplicaron las técnicas de renormalización de grupo para calcular las constantes de acoplamiento efectivas como funciones de la energía. Entendieron que el valor original para el parámetro de ángulo de mezcla, 0,375, era válido sólo ante la energía extrema característica de la unificación (alrededor de 10^{15} GeV) y encontraron un valor de unos 0,20 ante bajas energías. En 1974 este valor predicho era marcadamente menor que el mejor valor experimental (unos 0,35), pero experimentos posteriores dieron resultados mucho más coincidentes con el valor teórico. En 1980, el valor experimental había descendido a $0{,}23 \pm 0{,}02$, lo cual naturalmente llevó a que los físicos se tomaran la teoría en serio. Los cálculos de Georgi, Quinn y Weinberg también les encaminaron a estimar la masa de los bosones superpesados en un valor tan grande como el de 10^{17} GeV, que no estaba lejos de la masa de Planck y que, por tanto, sugería una conexión posible con la teoría de la gravitación. Con respecto a la vida de los protones, los tres físicos dieron la primera estimación teórica, concretamente entre 10^{31} y 10^{32} años. Según la sugerencia de Georgi y Glashow, se predecía la desintegración del protón como mediada por un bosón X que causaría que el protón cambiara a, por ejemplo, un pión neutro y un positrón. Debido a la desintegración del pión en pares de electrones generados por fotones gamma, la desintegración dejaría una traza claramente detectable de trayectorias de electrones ($p^+ \rightarrow \pi^0 e^+$; $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$; $\gamma \rightarrow e^- e^+$). Con los trabajos de Georgi, Glashow, Quinn y Weinberg, así como el trabajo independiente realizado por Abdus Salam y Jogesh Pati, la teoría unificada SU(5) fue lanzada con éxito como el primer y prototípico ejemplo de una teoría de gran unificación, o TGU, por sus siglas, para abreviar. Fue elevada enseguida por muchos teóricos que vieron que éste podría ser un paso importante hacia la largamente trabajada unificación de las fuerzas de la naturaleza. De acuerdo con un físico, «la idea de gran unificación nos libera de nuestra monótona existencia entre los desechos de la ruptura de la simetría, liberándonos para soñar sobre la física «verdadera» a 10^{16} GeV en un salto magnífico de la imaginación, probablemente sin precedentes en la historia de la física». La predicción de la inestabilidad del protón, y por tanto la inestabilidad de toda la materia, fue calificada como «la predicción más contundente de nuestra era» (Zee 1982, pp. 260 y 242). En 1981 existía una industria, pequeña pero en expansión, de la gran unificación. Una reseña de los artículos publicados en este año incluye alrededor de 800 referencias.

La posibilidad de que los protones pudieran ser inestables había sido mencionada brevemente, sólo para rechazarla, por Weyl en 1929. En 1938, Ernst Stueckelberg afirmó explícitamente: «ninguna transmutación de partículas pesadas (neutrón y protón) hacia partículas ligeras (electrón y neutrino) ha sido observada hasta ahora en ningu-

na transformación de materia. Por tanto, exigimos una ley de la conservación de la carga pesada» (Pais 1986, p. 488). La ley empírica de la conservación del nucleón de Stueckelberg llevó, en el periodo de posguerra, a la ley de conservación de bariones (el nombre «barión» fue propuesto por Abraham Pais en 1954). Aunque se daba por buena esta ley en general, unos cuantos experimentalistas buscaron indicios de desintegración de protones muchos años antes de que el tema estuviera en boga como resultado de las predicciones del SU(5). En 1954, Frederick Reines y Clyde Cowan estaban preparando los experimentos que, dos años después, resultarían en la detección del neutrino. Reines y Cowan, en colaboración con Maurice Goldhaber, observaron que su sistema de detectores también podría ser usado para fijar un límite menor en el tiempo de vida del protón, y concluyeron en 1954 que el tiempo de vida era mayor que 10^{22} años. Experimentos posteriores y más elaborados, desarrollados tres kilómetros por debajo de la superficie de la tierra en una mina de oro sudafricana en 1974 resultaron en un límite menor de 2×10^{30} años. Éste era un valor cercano al valor predicho teóricamente, pero el experimento, cuyo objetivo principal era la detección de neutrinos, no tenía conexión directa con la predicción de la desintegración de protones. De hecho, en 1974 llevaba funcionando casi tres años, para poder conseguir la sensibilidad necesaria. Al mismo tiempo, cuando Reines y M. F. Crouch publicaron el resultado a principios de 1974, sí que relacionaron su experimento con un «interés reciente en la posibilidad de que la conservación de bariones puede no ser un principio absoluto».

Cuando la predicción de TGU se hizo conocida, y especialmente después de que los nuevos cálculos de 1979 mostraran un tiempo de vida de 10^{31} años como probable (en lugar de los 10^{37} años, como algunos teóricos habían calculado), el interés en los experimentos de desintegración del protón aumentó drásticamente. El resultado fue una serie de grandes experimentos de gran unificación en la gran ciencia de Estados Unidos, India, Japón, la Unión Soviética y Europa. Uno de los primeros experimentos, a través de una colaboración entre laboratorios estadounidenses, se desarrolló en una profunda mina de sal en Ohio, rellenada con 10.000 toneladas de agua muy pura. El sistema detector pesaba unas 8.000 toneladas y empleaba más de 2.000 tubos fotomultiplicadores. No se encontró ninguna desintegración de protones en el experimento; aunque otros experimentos informaron de unos pocos candidatos para la desintegración de los protones, éstos no pudieron ser probados. La situación durante la siguiente década no cambió sensiblemente. Los experimentos se hicieron más grandes y más caros, pero no se encontraron signos seguros de desintegraciones de protones.

Que la teoría de la gran unificación no consiste sólo en cálculos matemáticos, sino que puede involucrar también algo de ciencia muy grande, se ilustra con el proyecto japonés-estadounidense Super-Kamiokande. Éste es el observatorio de neutrinos más grande del mundo, un detector Cherenkov de agua localizado en la mina de Kamioka al norte de Tokio. El tanque de agua Super-Kamiokande tiene un volumen de unos 50.000 metros cúbicos y está rodeado por unos 13.000 tubos multiplicadores suficientemente sensibles como para detectar fotones individuales. El detector ha buscado la desintegración de nucleones desde que es operativo en 1996, pero hasta ahora la bús-

queda ha sido en vano. ¿Significaba el fracaso en observar la desintegración de protones la refutación de la teoría de la gran unificación? No, los resultados experimentales mostraron que la teoría SU(5) original no era adecuada, pero no fueron interpretados como un fracaso de la idea de TGU como tal. Había muchas otras formas de TGU en el mercado, que ofrecían distintos tiempos de vida y de modos de desintegración del protón, por lo que el esquema de la TGU no era fácilmente descartable.

La desintegración predicha del protón no era la única razón por lo que las TGU eran consideradas como áreas extremadamente interesantes de investigación alrededor de 1980. Los bosones *X* y sus efectos eran indetectables, o casi, a temperaturas normales, pero se esperaba de ellos que desempeñaran un papel importante en las temperaturas mucho más altas que gobernaron el universo primitivo. Para poder estudiar los efectos físicos de las partículas *X*, el universo primodial del *big bang* era el laboratorio ideal (y dado que las energías de orden de 10^{15} GeV estaban mucho más allá de aquellas producidas por cualquier acelerador concebible, el único realista). Ya en 1967, el físico soviético Andrei Sajarov –quizá más conocido como disidente político– había sugerido que el número bariónico podía no conservarse exactamente y que la no conservación podía ser cosmológicamente importante. La sugerencia no atrajo mucho interés, y hubo que esperar hasta 1978, cuando el japonés Motohiko Yoshimura usó las nuevas TGU para predecir una simetría barión-antibarión causada por bosones *X* primordiales, para que la cosmología llegara a ser una parte importante de las TGU y viceversa.

Aunque el Super-Kamiokande no ha encontrado desintegración alguna de protones, su labor no ha sido en vano. En 1998 los datos de neutrinos de rayos cósmicos indicaron la existencia de oscilaciones de neutrinos, es decir, que los neutrinos muónicos cambian hacia algún otro tipo de neutrinos que no son neutrinos electrónicos corrientes. Los informes galvanizaron a la comunidad de física de partículas, ya que las oscilaciones significaban que al menos uno de los neutrinos involucrados debía poseer masa y que el modelo estándar debía, por tanto, ser modificado.

Teoría de las supercuerdas

A pesar de lo imprsionantes y completas que eran las teorías de la gran unificación, según algunos físicos no lo eran lo bastante. Desde un punto de vista metodológico, se veía como un defecto que no estuvieran basadas en un principio fundamental y que incluyeran varios parámetros libres, como las constantes de acoplamiento y las masas de quark y de leptón. Asimismo, las TGU no incluían la gravedad y por tanto eran incompletas. La candidata más popular del fin del siglo XX para una teoría unificada completa, la teoría de las supercuerdas, incluía una teoría cuántica de la gravedad y evitaba los parámetros libres. De todos modos, la teoría no había sido desarrollada originalmente como un intento de resolver el antiguo enigma de cómo unificar la mecánica cuántica y la relatividad general.

La teoría de cuerdas moderna tiene su origen en el contexto del programa inspirado en la matriz *S* para entender las interacciones fuertes. En 1968, el teórico ita-

liano Gabriele Veneziano sugirió un modelo de hadrones para explicar determinados procesos de colisión. Aproximadamente dos años después, Yoshiro Nambu y otros interpretaron la teoría de Veneziano como un modelo de cuerdas, más que de partículas. En cualquier caso, enseguida se vio que los modelos de cuerdas del tipo Veneziano-Nambu eran no físicos: describían sólo bosones, requerían un espacio-tiempo de 26 dimensiones y predecían una partícula de espín 2 sin masa, así como un taquión (como estado fundamental del espectro de masa). Los taquiones, partículas hipotéticas que se mueven más rápido que la luz, tienen masas imaginarias; aunque son coherentes con la teoría de la relatividad, no son partículas cuánticas aceptables.

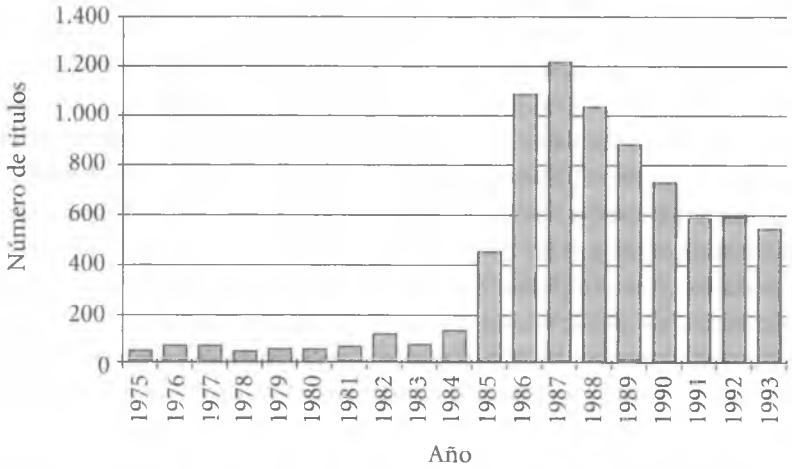
A principios de los años setenta, una teoría de alguna manera más realista, el «modelo pión dual decadimensional», fue elaborada por John Schwarz y André Neveu. La nueva teoría incorporaba tanto fermiones como bosones. Para que el modelo temprano de cuerdas sea una teoría consistente, el espacio-tiempo tiene que estar dotado de diez dimensiones, una temporal y nueve espaciales. La presencia inevitable de una partícula sin masa de espín 2 fue vista en principio como un defecto, porque ninguna partícula así podría ser de relevancia para la física de hadrones. Sin embargo, en 1974, Schwarz, en colaboración con el teórico francés Jöel Scherk, convirtió la dificultad en virtud al comprender que la partícula podría ser un gravitón. Hasta entonces, la teoría de cuerdas había sido una teoría de las interacciones fuertes, sin referencias a la gravitación. La teoría ahora era reinterpretada como una candidata a una teoría unificada de todas las fuerzas fundamentales. Se comprobó que, para encontrar el valor correcto de la constante de gravitación, la escala de longitud de las cuerdas necesitaba estar cercana a la longitud de Planck, es decir, inmensamente menor que las cuerdas hadrónicas originales. Los objetos de la teoría, las cuerdas, eran muy diferentes de las partículas puntuales (leptones, quarks) que aparecían en el modelo estándar. Las cuerdas son curvas unidimensionales de 10^{-35} metros de extensión que pueden existir en dos versiones, abiertas y cerradas. Las tensiones de las cuerdas son enormes, correspondientes a energías de 10^{19} GeV. Las excitaciones o vibraciones de una cuerda se interpretan como el origen del espectro de partículas elementales, con esperanza de incluir aquellas conocidas empírica y definitivamente, incluyendo muchas otras. En las teorías de supercuerdas, hay muchas partículas correspondientes a un tipo dado de vibración y se supone que todas las partículas conocidas pueden ser descritas por el estado fundamental. Las diez dimensiones necesarias se superan en un número de seis, pero las seis dimensiones extra se ondulan o «compactifican» de manera similar a la quinta dimensión en las teorías de Kaluza-Klein. Esto será, por tanto, no observable.

El interés en la teoría de cuerdas en los años setenta era limitado, en parte por el desarrollo con éxito de la CDC después de la «revolución de noviembre» en 1974. Aun así, un número reducido de teóricos continuaron trabajando en la teoría de las cuerdas, la cual en 1980 se había convertido en la teoría de supercuerdas, o sea, que incorporaba supersimetría espacio-tiempo. En las teorías supersimétricas (*SUSYs*), todas las

partículas tienen partículas hipotéticas asociadas, como los «squarks», «selectrones», «fotinos» y «gravitinos»; por ejemplo, un electrón es un electrón de espín cero supersimétricamente transformado. Ni el selectrón ni otros socios supersimétricos exóticos han sido jamás encontrados. Una de las ventajas de incorporar la supersimetría era que desaparecería el estado fundamental taquiónico. Las teorías de supercuerdas, tal como existían desde los primeros años ochenta, eran matemáticamente interesantes, pero no parecía que tuvieran mucha relevancia física. Incluso en el ámbito teórico, había varios problemas, básicamente que las teorías estaban plagadas de infinitos y lo que se conoce técnicamente como anomalías. Las anomalías son condiciones que incumplen las leyes de simetría o de conservación cuando la teoría es cuantizada, y, por tanto hacen que la teoría sea inconsistente. Existían otros problemas de consistencia, tales como que las diez dimensiones parecían incompatibles con la forma correcta de la teoría de las supercuerdas.

En el verano de 1984, Schwarz y su colaborador británico Michael Green, basándose en el trabajo de Edward Witten y otros, dieron nueva vida a la teoría demostrando que todas las anomalías podrían anularse entre sí en el caso de que la teoría estuviera gobernada por uno de los grupos de simetría internos conocidos como SO(32) y $E_8 \times E_8$. En la teoría de supercuerdas SO(32), la excitación de la carga surgió como resultado de incluir la gravedad, y fue esta teoría la primera que Schwarz y Green desarrollaron. Poco después de este importante hecho, Witten sugirió que las supercuerdas SO(32) podrían ser compactificadas para conseguir una teoría cuatridimensional. El artículo de Schwarz-Green inició lo que se vino a llamar la «revolución de las supercuerdas», que se inició casi exactamente diez años después de la «revolución» de la teoría de campo de gauge convencional. Otro componente importante de la revolución de 1984 fue el desarrollo de una nueva versión de la teoría de las supercuerdas, conocida como la teoría heterótica, llevado a cabo por David Gross y sus colaboradores en la Universidad de Princeton. La teoría de supercuerdas heterótica se basó en el grupo $E_8 \times E_8$ y solamente permitía cuerdas cerradas. Siendo una mezcla de la anterior teoría de cuerdas de bosones de 26 dimensiones y la nueva teoría supersimétrica decadimensional, la teoría heterótica se consideró prometedora con respecto a las conexiones con el mundo de las bajas energías. El hecho más destacable de las tres teorías de supercuerdas consistentes conocidas hasta finales de los ochenta residía en que eran únicas y estaban completamente libres de parámetros ajustables. La estructura matemática de la teoría de supercuerdas estaba hilada de manera tan densa que no se podía cambiar sin desmoronarse. Éste fue un hecho que atrajo a muchos teóricos físicos: en un contraste radical a las teorías unificadas más tempranas, dentro de la tradición de campo de gauge, el desarrollo completo de la unificación de supercuerdas fue matemático. No hubo ningún aporte experimental de los laboratorios ni sugerencias de nuevos experimentos basados en la teoría de supercuerdas.

Con los avances del otoño de 1984, la teoría de supercuerdas se hizo muy popular entre los teóricos de mente matemática. Ocurrió una especie de efecto arrastre. Mientras que el número anual de artículos relacionados con la teoría de cuerdas había sido



Gráfcio 27.1. Número de artículos sobre cuerdas y supercuerdas. *Fuente:* Galison 1995. Reimpreso con permiso de Walter de Gruyter GmbH & Co.

inferior a 100 durante los años 1975-1983, en 1987 se publicaron unos 1.200 artículos sobre el tema (véase gráfico 27.1). La teoría de las supercuerdas fue aclamada como un gran logro, casi la realización de un sueño de más de cien años, el trampolín hacia una nueva física, el codiciado Santo Grial de una teoría cuántica de la gravedad. Al menos, así era como los propios teóricos de cuerdas veían la situación. Witten esperaba que el próximo entendimiento correcto de la teoría de cuerdas «involucrara una revolución de nuestros conceptos de las leyes básicas de la física –similar en magnitud a cualquiera que haya ocurrido en el pasado–» (Davies y Brown 1988, p. 97). Proclamó que la teoría «dominará la próxima mitad de siglo, así como la teoría cuántica de campos ha dominado la mitad de siglo previa» (*PT* julio 1985, p. 20) y Schwarz sugirió que la teoría heterótica bien podría ser la mítica «teoría del todo» (TDT) que en principio implicaría el final de la física fundamental.

No todos los físicos estaban contentos con respecto a la autoproclamada revolución de las supercuerdas. El principal problema de la teoría de las supercuerdas, según muchos, era su deslumbrante falta de correspondencia con la experimentación. La teoría no predecía nada no trivial que pudiese ser comprobado, sin embargo se creía que incluía física a energías más bajas, las partículas y resultantes de la física convencional no podían deducirse de hecho de la teoría. No fue nada sorprendente que muchos experimentalistas de altas energías recibieran la revelación de las supercuerdas con algo menos que gran entusiasmo. Varios años antes del importante hito de las supercuerdas, en 1984, comenzó un acalorado debate. Los experimentalistas no estaban solos en la oposición a una teoría que sólo podía ser comprobada a través de las matemáticas: a éstos se unieron teóricos a los que no les gustaba la falta de contacto de la teoría con la experimentación. Entre los oponentes o escépticos estaban Feynman, Glashow, Schwin-

ger y Georgi, mientras que Weinberg y Salam estaban a favor y aceptaron con entusiasmo la teoría de las supercuerdas. Glashow fue uno de los oponentes más categóricos de los teóricos de supercuerdas, a los cuales criticó por sustituir arrogantemente la noción empírica de verdad con consideraciones puramente matemáticas de unicidad y belleza. «Hasta que los partidarios de las cuerdas no interpreten propiedades percibidas del mundo real, simplemente no están haciendo física», escribió Glashow en 1998. Se preguntó, retóricamente, «¿deberían pagarles las universidades y permitirles pervertir a estudiantes impresionables? [...] ¿No son las teorías sobre cuerdas más adecuadas en los departamentos de matemáticas o incluso en seminarios de teología que en departamentos de física?» (Galison 1995, p. 399). Para Glashow, los teóricos de cuerdas eran «fanáticos excéntricos que siguen visiones extrañas» y la moda de las supercuerdas una enfermedad «mucho más contagiosa que el sida» (Davies y Brown 1988, p. 191). Weinberg reconoció la dificultad de asociar la teoría de supercuerdas con una descripción física que pudiera ser probada experimentalmente, pero no consideró que eso fuese un defecto:

> La teoría final va a ser lo que es porque es matemáticamente consistente. Entonces la interpretación física vendrá sólo cuando pueda resolver la teoría y lo que predice para física a energías accesibles. Ésta es la física en un reino que no es accesible directamente a la experimentación, y el principio que lo guíe no puede ser la intuición física porque no tenemos ninguna intuición para lidiar a esta escala. La teoría debe estar condicionada por la consistencia matemática. Esperemos que esto conduzca a una teoría con soluciones que se parezcan al mundo real a energías accesibles. (Davies y Brown 1988, p. 221)

El interés en la teoría de las cuerdas declinó a principios de los noventa, pero en 1998, el optimismo y la emoción habían vuelto a la comunidad de las cuerdas. La razón principal de esto fueron los nuevos desarrollos en lo que se vino a conocer como teoría M, teoría P-brana y teoría D-brana, que son tipos de teorías de cuerdas generalizadas. El nuevo trabajo prometió nuevos modos de enlazar los resultados de las teorías de cuerdas y de aquellos de las teorías más convencionales de campo de gauge.

Cosmología cuántica

La idea de usar física de partículas para conformar y restringir las teorías cosmológicas ya data del origen de la física de partículas elementales a principios de los años treinta, y desempeñó un papel importante en los trabajos pioneros de Gamow, Alpher y Herman a finales de los cuarenta. Con el desarrollo rápido de la física de altas energías en los sesenta y setenta, la conexión cercana entre cosmología (y astrofísica) y la física de partículas se estrechó. De acuerdo con algunos físicos, la relación cambió el estado completo de la cosmología: Parece que [...] la cosmología se ha convertido en una verdadera ciencia en el sentido de que las ideas no sólo son desarrolladas sino que

también se prueban en el laboratorio [...] Esto dista mucho de lo que ocurría en los tiempos en que proliferaron las teorías cosmológicas y había pocas formas de confirmar o de refutar alguna de ellas aparte de por su atractivo estético» (Schramm y Steigman 1988, p. 66). Además, la confianza en el modelo caliente de *big bang* condujo a la gente a usar este modelo para obtener conocimientos de la física de partículas a energías extremas del universo muy temprano, energías muy por delante de lo que ningún acelerador en la tierra podría producir. En este sentido, el universo temprano se convirtió en «el acelerador del pobre», como se llamaba con asiduidad, mientras que la física de altas energías y la cosmología entraron en una relación crecientemente simbiótica. Mientras que la astrofísica nuclear era un campo bien establecido en los años cincuenta, la astrofísica de partículas emergió como un nuevo subcampo vigoroso de la física en los años setenta. Por ejemplo, la simbiosis se hizo manifiesta en la publicación *Astroparticle Physics*, fundada en 1992.

Según el escenario hipotético del *big bang*, tal como era aceptado por muchos especialistas alrededor de 1980, la fase inicial del universo ultradenso y ultracaliente de Planck (los primeros 10^{-43} segundos) estaba regida por la gravedad cuántica, y por tanto fuera del alcance del conocimiento científico presente. A la expansión siguió un enfriamiento y menores –aunque aún gigantescas– energías de 10^{16} GeV o más. En esta fase, las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas estaban unidas, de acuerdo con las teorías de la gran unificación. Una expansión posterior, ahora a un tiempo entre 10^{33} segundos y 10^{2} segundos después de cero, implicaba un deshielo o una ruptura simétrica de, en primer lugar, las interacciones fuertes y después las débiles y electromagnéticas. Al final de esta fase, se entendía que tanto la producción de los bosones *X* como la de los bosones *W* se había detenido y las fuerzas de color empezaron a existir en la forma de nucleones. Los periodos de enfriamiento consiguientes eran de menor interés para los físicos de altas energías, ya que correspondían a energías obtenibles en el laboratorio.

Como se menciona en el capítulo 23, uno de los primeros y más importantes resultados de partículas obtenidos de los cálculos de *big bang* era que el número de especies de neutrinos podría ser como mucho de cuatro, para poder concordar con la observada abundancia de helio, un resultado obtenido en 1977 por Gary Steigman, David Schramm y James Gunn. Posteriores refinamientos condujeron a un límite inferior de tres familias de neutrinos. La predicción, basada únicamente en argumentos cosmológicos, fue confirmada en 1993 con resultados del colisionador LEP (Large Electron Positron) del CERN, que indicaban que había sin duda tres especies de neutrinos. Como destacó Schramm, «de algún modo, ésta fue la primera vez que un colisionador de partículas había sido capaz de probar una teoría cosmológica, y también mostró que el matrimonio entre física de partículas y cosmología sin duda había sido consumado» (Schramm 1996, p. xvii). La frontera del número de especies de neutrinos suponía que los neutrinos no tenían masa o casi no la tenían. La posibilidad de los neutrinos tau pesados no podía ser excluida, pero los cálculos de 1991 mostraban que la nucleosíntesis primordial requería que la masa del neutrino tau

fuera menor de 0,5 MeV. Esta restricción concordaba con la obtenida experimentalmente, pero era más precisa que ésta y por tanto permitió que fuera otra prueba del escenario hipotético temprano del *big bang*. La restricción del número de familias de neutrinos a tres fue en general algo que llevó a implicar que el número de familias o «generaciones» de todas las partículas fundamentales (leptones y quarks) también estaba limitada a tres.

Los cálculos cosmológicos mencionados se asentaban en la teoría electrodébil estándar y a la vez la apoyaban, pero no a las TGU, incluyendo las interacciones fuertes. Las nuevas teorías de gran unificación de tipo SU(5) fueron inmediatamente empleadas para abordar cuestiones cosmológicas que habían permanecido hasta entonces más allá de la explicación. Una de las cuestiones era relativa al casi completo predominio de la materia respecto a la antimateria. ¿Por qué no hay, en tanto se pueda conocer, antimateria alguna en el universo? Continuando a partir de las especulaciones de Dirac de 1933, Maurice Goldhaber sugirió en 1956 que la simetría partícula-antipartícula se extendiera al universo entero. Propuso que el universo podría consistir en un cosmos y en un «anticosmos» separado desde el mismo comienzo de su existencia. Unos cuantos físicos estaban de acuerdo con Goldhaber en que el universo es simétrico entre la materia y antimateria a una escala muy grande, pero esto era una visión minoritaria. En los años sesenta, el físico sueco, y posteriormente premiado con un Nobel, Hannes Alfvén, sugirió una teoría cosmología basada en cantidades iguales de las dos formas de materia. Su teoría fue ignorada o rechazada, no sólo porque fuera propuesta como una alternativa al modelo de *big bang*, sino porque tampoco existía rastro de las ingentes cantidades de antimateria que requería. Hasta 1975, la cuestión de la antimateria había sido debatida durante dos décadas, pero no se le había encontrado ninguna explicación. La visión aceptada era que la asimetría de la materia, o la desigualdad del número bariónico, era por algún motivo parte de la condición inicial del universo. En otras palabras, más que explicar la asimetría, se tomaba como un factor contingente.

Con la no conservación del número bariónico incluido en las grandes teorías unificadas, se obtuvo fácilmente una explicación de la asimetría. En su trabajo de 1978, Yoshimura asumió un universo inicialmente simétrico, y mostró que el incumplimiento de la conservación del número bariónico y la invariancia *CP* característica de la TGU conducía a un exceso de partículas sobre las antipartículas poco después de la creación en $t = 0$. La razón de desintegración de partículas X en el universo muy temprano diferiría de aquél de las partículas anti-X, y el resultado habría sido de más quarks y leptones que antiquarks y antileptones. La aniquilación haría el resto del trabajo y la composición actual del mundo en términos de partículas podría ser vista, por tanto, como resultado de una gran unificación temprana. Durante el periodo de 1978-1980, Yoshimura, Weinberg, Frank Wilczek y otros usaron también la TGU para resolver otra cuestión cosmológica: básicamente, para decirlo en plata, saber por qué el universo está tan vacío. El número de bariones en la parte observable del universo es alrededor de 10^{79} (número de Eddington) y el de fotones de 10^{88}. Esta proporción se

considera como una cantidad fundamental, ya que la teoría prescribe que sea constante en el tiempo. ¿Por qué hay mil millones de veces más fotones que bariones? Según el razonamiento de la TGU, éste no siempre había sido el caso, pero era el resultado de la ligera asimetría en el proceso de aniquilación quark-antiquark en el universo temprano. La aplicación de la TGU a la cosmología condujo a éxitos brillantes, pero también a severos problemas. Por ejemplo, se esperaba que se formara un número grande de enormes monopolos primarios, unas 10^{16} veces más pesados que los protones. Sin embargo, no se ha observado nunca ni un solo monopolo.

La implicación cosmológica más importante de las TGU, una especie de derivación quizá fuera el modelo inflacionario presentado por Alan Guth en 1981 y mejorado por Andrei Linde y de modo independiente por Andreas Albrecht y Paul Steinhardt en 1982. El modelo del universo inflacionario se basaba fundamentalmente en la fase de transición relacionada con la ruptura espontánea de la simetría predicha por la TGU a una temperatura de unos 10^{27} K. Aunque este modelo tuvo éxito a los ojos de muchos cosmólogos, también los había que pensaban que la inflación era una quimera. ¿Cómo de en serio se debería tomar una teoría cosmológica que dependía por completo de una gran teoría unificada cuya principal predicción, la desintegración de protones, había fracasado en su verificación? Entre estas pasajeras modas teóricas, las supercuerdas no eran lo único que preocupaba a físicos y astrónomos. «[El modelo inflacionario] no tiene evidencias que lo apoyen», escribieron dos cosmólogos, «y sin embargo, como la teoría es bella en el aspecto matemático, muchos matemáticos la han asumido y han elegido no tomar en cuenta estos temas [...] la cosmología está aproximándose a la frontera en la que la ciencia ya no está basada en la evidencia experimental y deja de realizar predicciones comprobables. Una vez que se ha cruzado esta línea, hemos dejado atrás el mundo de la física y hemos entrado en el reino de la metafísica» (Rothman y Ellis 1987, p. 22).

Había físicos que lidiaban con los aspectos cuánticos de la cosmología en modos muy diferentes y mucho más especulativos que los físicos de las TGU. La idea de aplicar la mecánica cuántica directamente a todo el universo, sin existir una teoría cuántica de la gravedad, se remonta a Eddington y Schrödinger a finales de los años treinta. En 1939, Schrödinger llegó a la notable conclusión de que las partículas podrían haber sido creadas en un universo en expansión únicamente como resultado de la misma, pero su trabajo fue efectivamente olvidado. En los años cincuenta, Bryce DeWitt en los Estados Unidos llevó a cabo un programa de investigación relacionado, apoyándose en algunas de las ideas de Wheeler. La extravagante extrapolación de la mecánica cuántica al universo entero condujo a DeWitt en 1977 a una ecuación cuántica, una especie de ecuación cósmica de Schrödinger, que se hizo conocida como la ecuación Wheeler-DeWitt. Sin embargo, no estaba claro cómo interpretar la ecuación, cómo encontrar la solución única correspondiente a un solo y único universo y, por supuesto, cómo hacer algo útil con la ecuación en sí. Alexander Vilenkin, desarrollando una sugerencia anterior realizada por Edward Tyron, argumentó en 1982 que la existencia del universo podría ser entendida como un proceso de túnel de mecánica cuántica a partir de

una «nada» de fluctuaciones del vacío cuántico. El título del artículo de Vilenkin, «La creación de los universos a partir de la nada», debió de sorprender a muchos lectores de *Physical Letters*. Muchos otros físicos retomaron la idea de explicar la creación del universo como resultado de fluctuaciones del vacío: esto también captó la imaginación de teólogos y filósofos; sin embargo, la mayoría de los físicos consideraba esta fascinante idea salvajemente especulativa, y por supuesto lo era.

Impertérritos ante la ausencia de una teoría cuántica de la gravedad aceptable, desde alrededor de 1980 los modelos de gravitación cuántica han sido empleados por varios físicos para explicar la creación del universo a partir de un «estado» de nada. Uno de los más conocidos fue el propuesto por James Hartle y Stephen Hawking en 1983. Tomando como su punto de partida la ecuación de Wheeler-DeWitt, los dos físicos desarrollaron una función ondulatoria del universo, un concepto que encontraron legítimo, y afirmaron que representaba la amplitud del universo creándose a partir de unas partículas ligeras cuánticas finitas. De acuerdo con Hawking, no habría ningún problema relativo a la creación ya que en torno a $t = 0$ entre las fluctuaciones cuánticas, la misma noción de espacio y tiempo perdería su sentido. Por tanto, no habría singularidad y tampoco una frontera o borde de espacio-tiempo. Al ser autocontenido, el universo ni se crearía ni se destruiría. Según Hawking en su *best seller Breve historia del tiempo,* esta visión tiene implicaciones profundas más allá de los reinos científicos:

> Con el éxito de las teorías científicas para describir sucesos, la mayoría de la gente ha llegado a creer que Dios permite que el universo evolucione de acuerdo con un conjunto de leyes, en las que él no interviene para infringirlas. Sin embargo, [...] todavía dependería de Dios dar cuerda al reloj y elegir la forma de ponerlo en marcha. En tanto en cuanto el universo tuviera un principio, podríamos suponer que tuvo un creador. Pero si el universo es realmente autocontenido, si no tiene ninguna frontera o borde [en el tiempo] no tendría ni principio ni final: simplemente sería. ¿Qué lugar queda, entonces, para un creador? (Hawking 1988, p. 149)

lo que, quizá, sea un modo apropiado de terminar esta sección.

Cuarta parte:
una mirada atrás

CAPÍTULO 28

La física Nobel

La última voluntad de Alfred Nobel, el industrial sueco que amasó una fortuna gracias a la invención y manufactura de la dinamita, fue la fundación de la institución Nobel al completo. En 1900, tras un complejo proceso legal, el testamento tomó la forma de los estatutos de la Fundación Nobel, y los primeros galardones fueron concedidos el año siguiente. Alfred Nobel quería establecer premios anuales de física, química, fisiología (o medicina), literatura y lucha por la paz, pero su testamento era bastante vago, por lo que se les dejó a sus ejecutores y a la posterior institución Nobel que fijara los detalles y creara una maquinaria de organización. Según el testamento del 27 de noviembre de 1895, el dinero «debería ser concedido anualmente en galardones a aquellas personas que hayan contribuido en mayor medida a beneficiar a la humanidad durante el año inmediatamente precedente». La parte de la física galardonaría a «la persona que haya hecho el descubrimiento o invención más importante en el dominio de la física». Además, el testamento subrayaba que «no se dará ninguna consideración a cuál sea la nacionalidad de los candidatos, es decir, quien más se lo merezca será galardonado con el premio, sea o no de origen escandinavo» (Crawford 1984, p. 221).

Los premios Nobel se entregan oficialmente en una ceremonia que tiene lugar cada año en Estocolmo el 10 de diciembre, el día de la muerte de Nobel. Antes de que esto ocurra, tiene lugar un elaborado proceso. La Academia Real Sueca de la Ciencia, una corporación, de científicos suecos, principalmente, organizados en diferentes secciones, elige a cinco miembros de cada uno de los comités científicos, incluyendo el comité Nobel de Física. Una de las membresías está reservada para el presidente de la sección de física del Instituto Nobel. El poder real en el proceso de elección recae en estos miembros del comité. El comité permanente de la física recoge nominaciones de un número potencialmente amplio de nominadores, algunos permanentes y algunos asignados *ad hoc*. Aquellos designados permanentemente para nominar incluyen a todos los miembros del comité y de la Academia, previos laureados Nobel y profesores de física de las antiguas universidades escandinavas e instituciones similares. Los nomina-

dores *ad hoc* incluyen a profesores de universidades extranjeras seleccionadas y algunos científicos elegidos de manera individual.

Algunos de los que nominan hacen uso de su derecho a proponer candidatos al comité, que entonces considera todas las propuestas y prepara informes detallados sobre algunos de ellos. El comité delibera sobre cuál(es) candidato(s) recomienda, pero no tiene ninguna obligación de seguir la propuesta de la mayoría de los nominadores. De hecho, en la mayoría de los casos anteriores a 1940, los científicos más nominados no habían sido recomendados por el comité. Por ejemplo, en 1910, Poincaré fue sugerido por treinta y cuatro nominadores y Planck por diez, pero el comité decidió recomendar a Van der Waals, el cual sólo había sido propuesto por un nominador.

Aunque la decisión del comité es la parte crucial del sistema de nominación, no termina aquí. La nominación de un comité necesita ser confirmada por la sección de física de la Academia, y la propuesta se debate finalmente por el plenario de la Academia, el cual tiene la última palabra. Aunque la Academia casi siempre seguirá la recomendación del comité, no está obligada a ello. En 1908, por ejemplo, el comité recomendó a Planck y la sección de física de la Academia refrendó la propuesta. Sin embargo, cuando la Academia se reunió en sesión plenaria, el candidato físico fue rechazado por una significativa mayoría. Al final, se decidió entregar el galardón al físico francés Gabriel Lippman por su invención de un método para la fotografía a color. Una situación similar ocurrió cuatro años más tarde, cuando una reunión del pleno rechazó a Kamerlingh Onnes, el candidato recomendado por el comité de Física y la sección de Física de la Academia. De todos modos, Kamerlingh Onnes tuvo que esperar sólo un año más para recibir el premio.

El resultado del proceso de nominación puede muy bien decidir que ninguno de los candidatos propuestos es merecedor del premio. En ese caso, el premio se reserva para el año siguiente y normalmente se entrega entonces. En la primera mitad del siglo, esto no fue tan infrecuente, ya que ocurrió en 1921, cuando el premio se reservó para 1922 y entonces fue entregado a Einstein. Un premio puede ser reservado sólo por un año. Su aun así, no se entregara, será «permanentemente reservado», o sea, anulado. Esto ha ocurrido cinco veces con el premio de Física, en 1916, 1934, 1940, 1941 y 1942.

Nada más comenzar, el premio Nobel fue un éxito y se consolidó como el más prestigioso de los premios científicos. Una razón para explicar el estatus del premio y la publicidad que lo rodeaba era la cantidad de dinero involucrado. En 1901, consistía en unos 40.000 dólares, una cantidad con un poder de compra de casi el doble de su valor actual y, en su época, correspondiente a treinta veces el salario anual de un profesor universitario. Además de la continua importancia del premio, se añade el que la elección de un laureado con el Nobel normalmente ha sido reconocida como razonable por la comunidad física en general. Solamente en unos pocos casos se ha considerado la elección como «errónea» o «extraña», esto es, claramente diferente de las visiones de la mayoría de los físicos de elite. Asimismo, los premios Nobel de Ciencias han mantenido su reputación como galardones verdaderamente internacionales, no influidos claramente por factores políticos e ideológicos. En este sentido, hay una gran

diferencia entre los premios de ciencias y los premios de la paz y de literatura. Por supuesto, la política entra en la toma de decisiones, pero el premio está motivado científicamente, no políticamente. Nada más comenzar la institución Nobel, se comprendió que el galardón era un premio, no sólo al científico individual sino también a la nación a la cual pertenecía el científico. La competición por el premio era vista como un concurso entre naciones, una visión que ha prevalecido desde entonces. En los periodos de tensión y guerras, los premios no podían evitar ser asociados con sentimientos nacionalistas, de manera muy similar a las medallas ganadas durante los Juegos Olímpicos. El comité Nobel de Física, siempre, por razones entendibles, ha temido galardonar con un premio a un experimento que se demuestre equivocado o a una teoría que o bien no puede ser verificada o bien se demuestre errónea en el año siguiente. Por ejemplo, en 1903, LeBon fue nominado por sus rayos N, y en 1905 Blondlot por sus «rayos negros», en ambos casos con nominaciones de un solo científico. Se puede imaginar con facilidad qué hubiera significado para la reputación del premio Nobel si hubiera galardonado a uno o a ambos científicos franceses.

Las ambigüedades de los estatutos de la Fundación Nobel, que reflejan las ambigüedades del testamento, crearon una oportunidad para la arbitrariedad en la interpretación de qué tipo de trabajo científico era merecedor de un premio. Por ejemplo, ¿cómo de en serio debería tomarse la condición de «reciente»? En los estatutos de la Fundación Nobel, la condición fue suavizada y especificada para significar «el año inmediatamente precedente», para ser entendido en el sentido de «que una invención o un trabajo por el cual un premio contemplado bajo los términos del testamento pondrá de aquí en adelante los más modernos resultados de trabajo, [...] trabajos o invenciones más antiguos sólo serán tenidos en cuenta en caso de que su importancia no haya sido previamente demostrada». Aunque el criterio incluido en el testamento ya fue suavizado con el primer galardón –el descubrimiento de Röntgen tenía entonces cinco años– en general, lo reciente era considerado importante durante las primeras décadas. Fue una razón fundamental por la cual Boltzmann y Kelvin no fueron considerados para el premio. La institución Nobel estaba ansiosa de que el premio no fuera concedido por un servicio largo y meritorio en la física sino por un trabajo específico de origen reciente. Esto permaneció como la política oficial pero en la práctica no siempre se seguía. Ejemplos notables son Reines, cuyo descubrimiento del neutrino fue anterior en treinta y nueve años a su premio, y Kapitza, que tuvo que esperar unos cuarenta años antes de recibir su premio; el premio de Chandrasekhar fue unos cuarenta y cinco años posterior a su trabajo principal. El premio muy retrasado de Van Vleck es también otro ejemplo.

Otro problema, y más serio, era qué se incluía dentro del concepto de la física. Los términos «invención» y «beneficio para la humanidad» se tomaron se escogieron para significar que los avances en la física aplicada y la tecnología podrían ser reconocidos en paralelo al trabajo de la física pura. La invención de Marconi de la telegrafía sin hilos fue galardonada en 1909, y Gustav Dalén, un ingeniero sueco, recibió el premio en 1912 por su invención de la iluminación automática de los faros. Aunque el primer co-

mité de física miraba con simpatía los inventos, esta simpatía no se extendió a las patentes. En 1901, se decidió como regla que las invenciones patentadas no deberían ser consideradas para el premio. Naturalmente, esta política excluyó a la mayoría de los inventores con más éxito, desde Edison a Maiman. Desde 1912 ningún premio ha sido entregado por un trabajo puramente tecnológico. Entre los nominados sin éxito de las dos primeras décadas, se pueden encontrar famosos inventores como Edouard Branly (telegrafía sin cables), Valdemar Poulsen (generador de arco), Carl von Linde (máquinas de refrigeración), Ferdinand von Zeppelin (dirigibles), Orville y Wilbur Wright (avión), Michael Pupin (bobinas inductoras de carga) y Thomas Edison (bombilla eléctrica, fonógrafo y muchos más). El requerimiento de «beneficio para la humanidad» no fue un gran problema: siguiendo una antigua tradición en la ciencia académica, los miembros del comité pronto resolvieron que el progreso fundamental en la ciencia era, en sí mismo y por definición, un beneficio de la humanidad. En otras palabras, las consideraciones utilitaristas no tenían por qué entrar en la toma de decisiones. De este modo, se prescindió de justificar por qué la explicación de Lorentz del efecto Zeeman o, más tarde, la teoría de Schwinger de la electrodinámica cuántica, beneficiaban a la humanidad de alguna manera práctica.

La política de no conceder el estatus de premio Nobel a innovaciones tecnológicas no implicaba que se impidiera recibir el codiciado premio a los científicos empleados por compañías privadas. Como hemos visto, desde los años veinte, los laboratorios afiliados con industrias privadas han estado crecientemente involucrados en la ciencia pura y han contribuido al progreso de la física también en su nivel fundamental. Ejemplos tempranos son el premio de Química de Langmuir de 1932 y de Davissin de Física en 1937 (véase capítulo 9). La tabla 28.1 enumera los laureados en Física que realizaron su trabajo galardonado mientras trabajaban en, o estaban principalmente asociados a, laboratorios privados. El premio de 1986 fue entregado por el trabajo pionero en óptica electrónica y por el diseño del primer microscopio de electrones. El invento se remontaba a los primeros años treinta, cuando Max Knoll y Ernst Ruska en la Universidad Técnica de Berlín construyeron un microscopio electrónico operativo. Una gran parte del trabajo posterior de Ruska fue realizado en un laboratorio que Siemens y Halske montaron en 1937 y en el cual produjeron el primer microscopio electrónico comercial en 1939. La mitad del premio de 1986 fue a Heinrich Rohrer y Gerd Binnig por su diseño del microscopio de efecto túnel. Rohrer se unió al Laboratorio de Investigación de IBM en Suiza en 1963 y Binnig le siguió en 1978.

Originariamente, el comité definía la física de manera amplia, más como ciencias físicas que como física pura. La astrofísica, meteorología, geofísica y química física estaban incluidas, pero no la astronomía. En los años veinte hubo un cambio de opinión, de todos modos, resultando en una exclusión no oficial de la astrofísica y de las ciencias de la tierra. Si algún subcampo interdisciplinar o ciencia hermana debiera ser aceptada como física es desde luego un asunto político, más que de argumentos de principios. La práctica por lo tanto ha cambiado a lo largo de los años. En los primeros tiempos, cuando la astrofísica estaba definida como parte de la física, no se entre-

TABLA 28.1
Premios Nobel concedidos a físicos de laboratorios privados o asociados con ellos

Año	*Científicos*	*Instituciones*
1937	C. J. Davisson	AT&T / Bell Laboratories
1956	J. Bardeen, W. Brattain, W. Shockley	AT&T / Bell Laboratories
1977	P. W. Anderson	AT&T / Bell Laboratories
1978	A. Penzias, R. Wilson	AT&T / Bell Laboratories
1986	E. Ruska	Siemens & Halske
	H. Rohrer, G. Binning	Laboratorio de Investigación de IBM
1987	K. A. Müller, L. G. Bernorz	Laboratorio de Investigación de IBM

gó ningún galardón en esta área. El premio tardío de Bethe de 1967, galardonado por su teoría de 1938 de la producción de energía estelar, fue el primer premio dado en astrofísica. Coincidió con la rápida evolución de la astrofísica nuclear y relativista, que puso muy cercanas a la astronomía y la física y puede que hiciera cambiar la actitud de lo que constituía la física Nobel. En cualquier caso, entre 1974 y 1993 no menos de siete premios fueron concedidos por trabajos que deben clasificarse más cerca de la astronomía que de la física. También es importante mencionar que al menos un físico, Max Delbrück, recibió el premio Nobel de Biología. Con relación a la línea fronteriza entre la física y la química, las materias eran bastante diferentes, entre otras razones porque hay un premio por separado de química pero no de astronomía. Con una posible excepción, el premio de 1926 de Jean Perrin, ningún premio Nobel de Física ha sido entregado por un trabajo en química, incluyendo la química física y la física química. Esto puede parecer bastante natural –los químicos reciben premios de Química, los físicos de Física– pero la relación no es simétrica. Sin entrar en la discusión de las interrelaciones de la física y la química a lo largo del tiempo, es de reseñar que un gran número de premios Nobel de Química han sido entregados a científicos que eran físicos o cuyo trabajo normalmente se consideraría como perteneciente a la física. La mayoría de los trabajos premiados en la lista 28.2 bien podrían ser caracterizados de igual modo, o quizá incluso mejor, como física. La radiactividad, los isótopos, la estructura molecular y el descubrimiento de los elementos químicos eran tradicionalmente entendidos como pertenecientes a la química, lo cual explica algunos de los premios. El caso más conocido es el premio entregado a Rutherford, que consideró su trabajo sobre la radiactividad como estrictamente físico y consideraba de poca monta a la química. La naturaleza interdisciplinar de muchos descubrimientos en el campo de la radiactividad y la química nuclear en ocasiones ha conducido a decisiones controvertidas. Una de ellas tiene que ver con el descubrimiento de la fisión nuclear, que fue investigada por el comité químico ya en 1941. En 1945, el premio de Química de 1944 fue entregado sólo a Hahn, mientras que Strassmann, Meitner y Frisch no fue-

TABLA 28.2
Premios de Química concedidos a físicos o en áreas de investigación de naturaleza física

Año	*Laureado*	*Trabajo Nobel*	*Contexto del laureado/a*
1908	Ernest Rutherford	desintegración radiactiva	física
1911	Marie Curie	descubrimiento de Ra y Po	física
1920	Walther Nernst	termodinámica química	química física
1921	Frederick Soddy	radiactividad, isótopos	química física
1922	Francis Aston	espectroscopía de masas	física
1932	Irving Langmuir	química de superficies	química física
1934	Harold C. Urey	deuterio	química nuclear
1935	Frédéric Joliot	radiactividad artificial	física
	Irene Joliot-Curie		física
1936	Peter Debye	estructura molecular	física
1944	Otto Hahn	descubrimiento de la fisión	química física
1949	William Giauque	métodos de bajas temperaturas	química física
1951	Edwin McMillan	elementos transuránicos	física
	Glenn Seaborg		química nuclear
1960	Willard Libby	método de datación C-14	química nuclear
1968	Lars Onsager	termodinámica irreversible	química física
1971	Gerhard Herzberg	estructura molecular	física
1977	Ilya Prigogine	estructuras disipativas	química física

ron considerados. Meitner y Frisch, que habían sido los primeros en explicar correctamente los experimentos de Berlín, fueron nominados para un premio de Física, pero el informe del comité fue negativo. Se juzgó que la explicación de Meitner y Frisch era más bien una suposición con suerte y que si debía ser galardonada la explicación teórica, sería más bien el no nominado Bohr quien merecería el premio.

Los miembros individuales de los comités científicos eran a veces muy influyentes en la política científica Nobel y tuvieron éxito, por ejemplo, en promocionar a sus favoritos en ramas concretas de investigación física. En los años veinte el teórico Carl Oseen fue en gran medida responsable por el giro gradual hacia la física teórica que señaló una ruptura con respecto al pasado experimental. El químico físico Svante Arrhenius ejerció gran influencia en las primeras decisiones Nobel tanto en química como en física. Usó su posición para destacar la teoría atómica y fue decisivo en los premios entregados a Rutherford y a Planck. Arrhenius también tuvo éxito cuando bloqueó durante un largo periodo el premio de Química para Nernst, en este caso no tanto por razones científicas como personales.

Un trabajo digno de un premio Nobel tenía que ser un «descubrimiento o invención», lo que en origen llegó a significar que el trabajo puramente teórico no estaba

acreditado para un premio. Durante las dos primeras décadas aproximadamente, el comité de física estaba dominado por los experimentales y tenía predilección por los experimentos de alta precisión. Esto reflejaba la tendencia experimentalista general en la física sueca de la época. De este modo, entre 1890 y 1920, setenta y siete suecos se doctoraron en física en las universidades del país en Estocolmo, Lund y Uppsala. Sesenta y siete de las tesis presentadas eran sobre todo experimentales y sólo diez teóricas. El comité de física no tenía ganas de considerar la física teórica de modo serio si la teoría no había sido directamente verificada por la experimentación. La física teórica y matemática a menudo se consideraba como «especulativa». El ideal de la ciencia fue expresado por un físico sueco en un comentario de 1918 sobre la teoría de la relatividad de Einstein. Esta teoría, escribió, cultivaba la teoría por sí sola y atraía a los jóvenes. Pero «las personas mayores, que han conocido varias teorías a lo largo de su vida [...] están más inclinadas a estar satisfechas sólo con conocimiento fáctico, por ejemplo, con teorías experimentalmente demostrables, y son escépticas con relación a las teorías que no pueden ser verificadas [...] Es un gusto simple y poco cultivado el que se deja llevar por tales teorías [abstractas]» (Elzinga 1995, p. 84). La mayoría de los miembros del comité Nobel, independientemente de su edad, eran «personas mayores». Es bien sabido que Einstein no recibió su premio Nobel por la teoría de la relatividad sino por su explicación de 1905 del efecto fotoeléctrico, o mejor dicho, el premio fue entregado por la predicción de la ley fotoeléctrica correcta, no por la teoría fotónica sobre la cual estaba basada la teoría: para ser precisos, «por sus contribuciones a la física teórica, en especial por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico», destacando la palabra mágica «descubrimiento». Hasta 1922, Einstein había sido nominado en no menos de 62 ocasiones, y sólo una de las nominaciones mencionaba específicamente el efecto fotoeléctrico. El físico sueco que escribió el informe sobre la teoría de la relatividad de Einstein concluyó que su aceptación era una «cuestión de fe» y otro miembro del comité aseguró que «es altamente improbable que Nobel tuviera en cuenta especulaciones tales como éstas para ser objeto de sus premios» (Friedman 1981, p. 795). Desde entonces, el comité empezó a juzgar el trabajo teórico bajo una óptica más favorable, especialmente con la elección de Oseen en 1923, pero la actitud general era todavía conservadora y no confiaba en la física teórica sin una conexión fuerte con el trabajo experimental. Cuando Heisenberg y Schrödinger fueron propuestos para el premio de 1929, el comité resolvió que la mecánica cuántica «todavía no ha dado lugar a ningún descubrimiento nuevo de una naturaleza más fundamental» y en su evaluación de 1933 de Dirac, Oseen concluyó que el joven teórico británico hasta entonces no había hecho ningún «trabajo innovador realmente grandioso» (Kragh 1990, p. 116). Así y todo, los tres pioneros cuánticos fueron finalmente galardonados con el Nobel.

La tabla 28.3 agrupa los premios Nobel de Física desde 1901 hasta 1998. Contando a todos, 160 científicos han recibido el premio de Física, bien dividido o bien sin dividir. De los 160 destinatarios del premio, sólo dos (el 1,3 por 100) eran mujeres, en concreto Marie Curie y Maria Goeppert-Mayer. Teniendo en cuenta que ambas recibieron la cuarta parte del premio, el total final de mujeres premios Nobel es de medio. Asi-

mismo, sólo ha habido dos destinatarios del Tercer Mundo, o tres si incluimos a Chandrasekhar. Ningún físico africano o latinoamericano ha recibido nunca el galardón. La mayoría de ganadores del premio Nobel han sido europeos (54,4 por 100) o estadounidenses (41,9 por 100) en la época en que desarrollaban su trabajo. Mientras que hasta 1940 los físicos de Alemania e Inglaterra eran los más homenajeados (recibiendo cada nación el 22 por 100 de los premios), hasta 1970 los físicos estadounidenses habían recogido más premios Nobel que los físicos alemanes y británicos juntos.

TABLA 28.3
Premios Nobel de Física

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1901	Wilhelm K. Röntgen	Alemania	Rayos X	1895	E
1902	Pieter Zeeman	Países Bajos	Efecto Zeeman	1896	E
	Hendrik A. Lorentz	Países Bajos	—	1896	T
1903	Antoine H. Becquerel	Francia	Radiactividad	1896	E
	Pierre Curie	Francia	—	~ 1898	E
	Marie Curie	Francia	—	~ 1898	E
1904	Lord Rayleigh	Inglaterra	Argón	1895	E
1905	Philipp Lenard	Alemania	Rayos catódicos	~ 1902	E
1906	Joseph J. Thomson	Inglaterra	Electrón	1897	E
1907	Albert A. Michelson	EEUU	Interferometría de precisión	~ 1890	E
1908	Gabriel Lippmann	Francia	Fotografía a color	~ 1895	E
1909	Guglielmo Marconi	Italia	Telegrafía sin hilos	~ 1895	E
	C. Ferdinand Braun	Alemania	—	~ 1897	E
1910	Johannes van der Waals	Países Bajos	Gases y líquidos	1873	T
1911	Wilhelm Wien	Alemania	Radiación de calor	1896	T
1912	Nils Gustav Dalén	Suecia	Reguladores automáticos	1907	E
1913	Heike Kamerlingh Onnes	Países Bajos	Bajas temperaturas	~ 1908	E
1914	Max von Laue	Alemania	Difracción de rayos X	1912	E/T
1915	William H. Bragg	Inglaterra	Estructura cristalina	1912	E
	William L. Bragg	Inglaterra	—		
1917	Charles Barkla	Inglaterra	Rayos X secundarios	1905	E
1918	Max Planck	Alemania	Teoría cuántica	1900	T
1919	Johannes Stark	Alemania	Efecto Stark	1913	E

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1920	Charles-Edouard Guillaume	Francia	Aleaciones de níquel-acero	~ 1895	E
1921	Albert Einstein	Suiza	Efecto fotoeléctrico	1905	T
1922	Niels Bohr	Dinamarca	Teoría atómica	1913	T
1923	Robert Millikan	EEUU	Carga del electrón y efecto fotoeléctrico	1911-1915	E
1924	Karl M. Siegbahn	Suecia	Espectroscopía de rayos X	~ 1922	E
1925	James Franck	Alemania	Colisiones electrón-átomo	~ 1915	E
	Gustav Hertz	Alemania	—		
1926	Jean Perrin	Francia	Equilibrio de sedimentación	1908	E
1927	Arthur H. Compton	EEUU	Efecto Compton	1923	E
	Charles T. R. Wilson	Inglaterra	Cámara de niebla	1911	E
1928	Owen Richardson	Inglaterra	Fenómenos termiónicos	~ 1910	T
1929	Louis de Broglie	Francia	Naturaleza ondulatoria de los electrones	1923	T
1930	Chandrasekhara Raman	India	Efecto Raman	1928	E
1932	Werner Heisenberg	Alemania	Mecánica cuántica	1925	T
1933	Paul Dirac	Inglaterra	Mecánica cuántica	1925-1928	T
	Erwin Schrödinger	Austria	Mecánica ondulatoria	1926	T
1935	James Chadwick	Inglaterra	Neutrón	1932	E
1936	Victor Hess	Austria	Radiación cósmica	~ 1911	E
	Carl D. Anderson	EEUU	Positrón	1932	E
1937	Clinton J. Davisson	EEUU	Naturaleza ondulatoria de los electrones	1927	E
	George P. Thomson	Inglaterra	—	1927	E
1938	Enrico Fermi	Italia	Reacciones nucleares de neutrones	1934	E
1939	Ernest Lawrence	EEUU	Ciclotrón	1932	E
1943	Otto Stern	Alemania	Método de haces moleculares	~ 1920	E
1944	Isidor Rabi	EEUU	Método de resonancia magnética	1930s	E
1945	Wolfgang Pauli	Austria	Principio de exclusión	1925	T
1946	Percy Bridgman	EEUU	Física de altas presiones	~ 1930	E

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1947	Edward Appleton	Inglaterra	Capa de Appleton	1926	E
1948	Patrick M. S. Blackett	Inglaterra	Física de cámara de niebla	~ 1933	E
1949	Hideki Yukawa	Japón	Teoría del mesón	1935	T
1950	Cecil F. Powell	Inglaterra	Descubrimiento del mesón	1947	E
1951	John D. Cockcroft	Inglaterra	Acelerador de alta tensión	1932	E
	Ernest Walton	Inglaterra	—		
1952	Felix Bloch	EEUU	Magnetismo nuclear	~ 1945	E/T
	Edward Purcell	EEUU	—		
1953	Frits Zernike	Países Bajos	Método de fase-contraste	~ 1932	E
1954	Max Born	Alemania	Mecánica cuántica	1926	T
	Walther Bothe	Alemania	Método de coincidencia	1924	E
1955	Willis Lamb	EEUU	Efecto Lamb en hidrógeno	1947	E
	Polykarp Kusch	EEUU	Momento magnético del electrón	1947	E
1956	John Bardeen	EEUU	Efecto transistor	1948	E
	Walter Brattain	EEUU	—		
	William Shockley	EEUU	Transistor de unión	1949	E
1957	Chen Ning Yang	EEUU	No-conservación de paridad	1957	T
	Tsung Dao Lee	EEUU	—		
1958	Pavel Cherenkov	URSS	Efecto Cherenkov	1935	E
	Ilya M. Frank	URSS	—	1937	T
	Igor Tamm	URSS	—		T
1959	Owen Chamberlain	EEUU	Antiprotón	1955	E
	Emilio Segrè	EEUU	—		
1960	Donald Glaser	EEUU	Cámara de burbujas	1952	E
1961	Robert Hofstadter	EEUU	Esparcimiento de electrones en el núcleo	~ 1955	E
	Rudolf Mossbauer	Alemania	Efecto Mössbauer	1958	E

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1962	Lev Landau	URSS	Teoría del helio líquido	~ 1941	T
1963	Eugene Wigner	EEUU	Principios de simetría	~ 1930	T
	Maria Goeppert-Mayer	EEUU	Estructura nuclear orbital	1948	T
	J. Hans D. Jensen	Alemania	—	1948	T
1964	Charles Townes	EEUU	Electrónica cuántica (láser)	1954	E
	Nikolai G. Basov	URSS	—	1955	E
	Alexander Prokhorov	URSS	—		E
1965	Richard Feynman	EEUU	Electrodinámica cuántica	1949	T
	Julian Schwinger	EEUU	—	1948	T
	Sin-Itiro Tomonaga	Japón	—	1943	T
1966	Alfred Kastler	Francia	Doble resonancia	1950	E
1967	Hans Bethe	EEUU	Producción de energía estelar	1938	T
1968	Luis Alvarez	EEUU	Partículas elementales	~ 1962	E
1969	Murray Gell-Mann	EEUU	Teoría de partículas elementales	1962-1964	T
1970	Hannes Alfvén	Suecia	Magnetohidro-dinámica	~ 1948	T
	Louis E. F. Néel	Francia	Modelos de magnetismo	1932-1948	T
1971	Dennis Gabor	Inglaterra	Holografía	1948	E
1972	Leon Cooper	EEUU	Teoría de la super-conductividad	1957	T
	John Schrieffer	EEUU	—		
	John Bardeen	EEUU	—		
1973	Leo Esaki	Japón	Túnel semiconductor	1957	E
	Ivar Giaver	EEUU	—		E
	Brian Josephson	Inglaterra	Efecto Josephson	1962	T

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1974	Antony Hewish	Inglaterra	Pulsares	1967	E
	Martin Ryle	Inglaterra	Técnicas de radioastronomía	1954	E
1975	Aage Bohr	Dinamarca	Modelo nuclear colectivo	1953	
	Ben Mottelson	EEUU	—		
	L. James Rainwater	EEUU	—	1950	T
1976	Burton Richter	EEUU	Partícula J/ϕ	1974	E
	Samuel Ting	EEUU	—		E
1977	Hohn van Vleck	EEUU	Teorías de magnetismo	1930s	T
	Nevill Mott	Inglaterra	Teoría de metal	~ 1936	T
	Philip Anderson	EEUU	Teoría del estado sólido	~ 1960	T
1978	Peter Kapitza	URSS	Física de bajas temperaturas	~ 1940	E
	Arno Penzias	EEUU	Radiación de fondo 3 K	1965	E
	Robert Wilson	EEUU	—		
1979	Steven Weinberg	EEUU	Teoría electrodébil	1967	T
	Abdus Salam	Pakistán	—	1967	T
	Sheldon Glashow	EEUU	—	1961	T
1980	James Cronin	EEUU	No-conservación CP	1964	E
	Val Fitch	EEUU	—		
1981	Kai M. Siegbahn	Suecia	Espectroscopía de electrones	1950s	E
	Nicolas Bloembergen	Países Bajos	Espectroscopía láser	1956	E
	Arthur Schawlow	EEUU	—	~ 1956	E
1982	Kenneth Wilson	EEUU	Fenómenos críticos	1970	T
1983	William Fowler	EEUU	Astrofísica nuclear	~ 1960	T
	Subrahmanyan Chandrasekhar	India	Estructura de las estrellas	1934-1939	T
1984	Carlo Rubbia	Italia	Descubrimiento de W y de Z	1983	E
	Simon van der Meer	Paises Bajos	—		
1985	Klaus von Klitzing	Alemania	Efecto Hall cuantizado	1980	E

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1986	Ernst Ruska	Alemania	Microscopio electrónico	1930s	E
	Heinrich Rohrer	Suiza	Microscopio de efecto túnel	1978	E
	Gerd Binnig	Alemania	—		
1987	Karl Alex Müller	Suiza	Alta superconductividad T	1986	E
	J. Georg Bednorz	Alemania	—		
1988	Leon Lederman	EEUU	Neutrino muón	1962	E
	Melvin Schwartz	EEUU	—		
	Jack Steinberger	EEUU	—		
1989	Norman Ramsey	EEUU	Relojes atómicos	1950s	E
	Hans Dehmelt	Alemania	Técnica de confinamiento de iones	1973	E
	Wolfgang Paul	Alemania	—	1950s	E
1990	Richard Taylor	EEUU	Dispersión elástica profunda	1960s	E
	Henry Kendall	EEUU	—		
	Jerome Friedman	EEUU	—		
1991	Pierre-Gilles de Gennes	Francia	Cristales líquidos	1974	E
1992	Georges Charpak	Francia	Aparatos de detección	1970s	E
1993	Russell Hulse	EEUU	Descubrimiento del pulsar binario	1974	E
	Joseph Taylor	EEUU	—		
1994	Bertram Brockhouse	Canadá	Espectroscopía de neutrones	~ 1960	E
	Clifford Shull	EEUU	—		
1995	Martin Perl	EEUU	Descubrimiento del leptón tau	1974	E
	Frederick Reines	EEUU	Descubrimiento del neutrino	1956	E
1996	David M. Lee	EEUU	Superfluidez en el He-3	1972	E
	Robert Richardson	EEUU	—		
	Douglas Osheroff	EEUU	—		

Año	*Nombre(s)*	*País*	*Objeto de estudio*	*Año de descubrimiento*	
1997	Steven Chu	EEUU	Enfriamiento láser de átomos	1980s	E
	William Phillips	EEUU	—		
	Claude Cohen-Tannoudhi	Francia	—		
1998	Robert Laughlin	EEUU	Cuasipartículas electrónicas	1982	T
	Horst Störmer	Alemania	—		E
	Daniel Tsui	EEUU	—		E
1999	Gerardus 't Hooft Martinus J. G. Veltman	Países Bajos	Estructura cuántica de las interacciones electrodébiles		
2000	Zhores I. Alferov	Rusia	Comunicaciones		
	Hervert Kroemer	Alemania	Semiconductores		
	Jack S. Kilby	EEUU	Circuito integrado		
2001	Eric A. Cornell	EEUU	Condensación Bose-Einstein		
	Wolfang Ketterle	Alemania			
	Carl E. Wieman	EEUU			
2002	Raymond Davis Jr.	EEUU	Neutrinos cósmicos		
	Masatoshi Koshiba	Japón			
	Riccardo Giacconi	EEUU	Rayos X cósmicos		
2003	Alexei A. Abrikosov	EEUU y Rusia	Superconductores y superfluidos		
	Vitaly L. Ginzburg	Rusia			
	Anthony J. Leggett	Reino Unido y EEUU			
2004	Frank Wilczek	EEUU	Libertad asintótica en la interacción fuerte		
	David J. Gross				
	H. David Politzer				
2005	Roy J. Glauber	EEUU	T. cuántica de coherencia óptica		
	John L. Hall	EEUU	Espectroscopía láser de precisión		
	Theodor W. Hänsch	Alemania			

Nota: El año del premio se refiere al año en el cual ha sido impuesto, no el año en el cual el laureado recibió el premio. Las letras «E» y «T» indican si el trabajo era principalmente experimental o teórico. Las nacionalidades se refieren al periodo del trabajo premiado o, si éste ha ocupado un periodo extenso de tiempo, a la primera parte del periodo.

CAPÍTULO 29

Un siglo de física en retrospectiva

Crecimiento y progreso

El siglo XIX a menudo ha sido identificado como la era de la ciencia, y sin duda fue durante este siglo cuando emergió la ciencia moderna como algo más que una actividad intelectual para un pequeño grupo de filósofos naturales; sólo durante este siglo la ciencia se organizó en el ámbito nacional, y en menor medida internacionalmente, y sólo entonces se comprobó su valía para la sociedad en general. Sin embargo, el siguiente siglo puede, con más justificación incluso, ser llamado el siglo de la ciencia, porque fue durante este periodo cuando la ciencia vino a dominar no sólo la esfera intelectual sino también gran parte de las esferas social, económica y militar de la vida. La ciencia despegó en el siglo XIX, estuvo plenamente establecida y preparada para la acción en 1900 y entonces se embarcó en un curso de evolución rápida que no ha tenido precedentes en la historia entera de la humanidad. En primer lugar es un crecimiento cuantitativo el que ha caracterizado el avance de la ciencia en el último siglo del segundo milenio. Por supuesto, la física no es la única ciencia que ha experimentado un crecimiento destacable. En general, todas las ramas clásicas de la ciencia se han expandido a gran escala a lo largo del siglo, aunque con patrones bastante diferentes entre sí: por ejemplo, mientras que la física estabilizó su crecimiento durante las últimas dos o tres décadas, ha habido un periodo de crecimiento sostenido en las ciencias biológicas y medioambientales.

Alrededor de 1900, como vimos en el capítulo 2, la física era un negocio floreciente pero pequeño, con un número total de físicos académicos menor de 1.500. La antigua Sociedad Física Alemana incluía a unos 350 miembros, y la membresía en la nueva Sociedad Física Americana era de menos de un centenar. El número de publicaciones físicas, como se informa en las principales revistas de resúmenes de artículos, era de alrededor de 2.400. En los años noventa, el mundo de la física había crecido en tamaño de modo muy sustancial. La membresía en los dos sociedades físicas se había incre-

mentado a unos 25.000 (en Alemania) y a 40.000 (en los Estados Unidos) y el número de artículos de investigación resumidos en *Physics Abstracts* se aproximaba a los 200.000. La población mundial de físicos era más de 150.000. Redondeando, la mano de obra y la producción de artículos se han incrementado por un factor de cien en menos de un siglo. Los gastos en investigación de física y de formación sin duda se habrán incrementado por un factor aun mayor.

Al crecimiento en la física, que despegó sobre todo después del final de la Primera Guerra Mundial, le siguió, al principio lentamente, un modo diferente de organización y de hacer la física. El cambio ya fue visible a finales de los años veinte, pero el gran avance real fue sin duda la Segunda Guerra Mundial y los grandes cambios que la guerra y sus consecuencias causaron en la ciencia y que resultaron tan útiles para los objetivos militares. Un resultado del cambio generacional de la posguerra y el giro general hacia modos instrumentalistas y pragmáticos de pensamiento fue que la filosofía perdió su lugar en la física. Muchos miembros de la generación más temprana de físicos tenían un hondo interés en cuestiones filosóficas y a veces se inspiraron en filósofos en su trabajo innovador, o debatían competentemente las implicaciones filosóficas de la nueva física. Para Planck, Bohr, Schrödinger, Weyl, Heisenberg, Einstein, Eddington y muchos otros de sus colegas, la filosofía era un aspecto importante de la física. Pocos de los líderes de la física de la posguerra se preocuparon acerca de la filosofía o tenían un conocimiento más que superficial del campo. En los años sesenta, con las muertes de Bohr y Schrödinger, la que antes fuera orgullosa y vital tradición de físicos-filósofos llegó a su final.

Después de 1945, la física comenzó su marcha a toda velocidad hacia la era de la gran ciencia, aunque debería tenerse en cuenta que la gran ciencia de tipo glamoroso encontrada en la física de altas energías experimental no era ni es típica de la física en general. Incluso los físicos de la pequeña ciencia se vieron influidos por la tendencia, cuyo resultado más importante fue el salto del físico individual como productor de unidades de conocimiento a colectivos, equipos o colaboraciones. En cuanto a la bibliometría, la tendencia se manifestó a través de un cambio desde los artículos de investigación con un autor individual a artículos de investigación con múltiples autores. La tendencia inevitable hacia la colectivización –inevitable por el ritmo de crecimiento y la complejidad de los instrumentos y también por la creciente interdisciplinaridad de muchos campos de la física– no significa que los días de las grandes individualidades hayan terminado. La verdadera creatividad aún subyace en el genio de científicos individuales, una aseveración que se ve apoyada por la historia de la física de la posguerra a un nivel no inferior que en la física más heroica de la preguerra, con su aparente abundancia de genios desde Planck y Einstein hasta Bohr y Yukawa.

A lo largo del siglo, la física ha seguido siendo una ciencia verdaderamente internacional, o quizá la palabra cosmopolita sea más adecuada, por ser un hecho característico que muchísimos físicos se hayan mudado sin esfuerzos de un país a otro, de una ciudad a otra, de un laboratorio a otro, con el propósito de trabajar bajo las mejores condiciones posibles sin prestar mucha atención a las ubicaciones nacionales. Quizá

nos gustaría pensar en la física de finales del siglo XX como mucho más cosmopolita de lo que era previamente, pero de hecho los físicos jóvenes siempre se han movido (más o menos) con libertad de un país a otro y han pensado que su ciencia es transnacional. Por otro lado, caracterizar la física como internacional en el aspecto social sería una exageración. A pesar de los grandes cambios políticos que han ocurrido en la relación entre la parte rica del norte del mundo y el denominado Tercer Mundo, la física todavía está completamente dominada por Europa y Norteamérica. El hecho de que antiguas colonias se hayan convertido en naciones independientes y que algunos de los países tercermundistas (en especial en el este asiático y en América del Sur) se hayan desplazado de países en desarrollo a países desarrollados apenas se refleja en la composición internacional de la física: de los ochenta artículos presentados durante la conferencia mundial de París en 1900, dos fueron entregados por físicos de lo que más tarde se llamarían países del Tercer Mundo. Si se hubiera dado una conferencia correspondiente en 1995 (aun impensable como pueda serlo), el porcentaje no hubiera sido mayor.

Lo que se ha dicho del tema del Tercer Mundo se puede decir también respecto del tema de género. En 1900, la física estaba casi absolutamente dominada por hombres, así como lo estaban todas las ramas de la ciencia y, por supuesto, toda la vida pública y profesional. Noventa años más tarde, el número de mujeres físicas se ha incrementado muy notablemente y relativamente más rápido que el número de hombres físicos, pero el incremento no ha producido mucha diferencia. En el ámbito mundial, la proporción de mujeres es todavía menor del 10 por 100, una cifra que se compara de manera desfavorable con las cifras correspondientes en las ciencias biológicas y químicas. Además, las mujeres raramente han dado el paso hacia la elite de la física, y en investigación fronteriza son todavía menos visibles que lo que se esperaría dada su proporción de puestos de enseñanza. Marie Curie se mantiene como la mujer física del siglo, y de hecho de todos los tiempos.

Por lo general, la física a principios de siglo estaba dominada por Alemania, Inglaterra y Francia (para más detalles, véase capítulo 2). Alemania, al contrario que Francia, siguió desempeñando un papel destacado hasta bien entrada la década de los treinta y los físicos británicos nunca cesaron de contribuir de manera significativa a la física mundial. En los años treinta, los Estados Unidos ya se habían convertido en la nueva potencia mundial en la física al igual que en otras ciencias y en especial en el desarrollo tecnológico. A pesar del crecimiento de la comunidad soviética de física, durante décadas después de la guerra, la física estadounidense disfrutó de una posición casi hegemónica. Sin duda, uno de los cambios más notables de la física del siglo XX, especialmente si se compara con el siglo anterior, ha sido el auge de la dominación de la física estadounidense. Durante el último cuarto de siglo, el dominio se ha mostrado menos marcado y Europa, en cierto modo, ha vuelto a escena, pero Estados Unidos aún es incuestionablemente la nación líder en física. Por otro lado, la naturaleza transnacional o cosmopolita creciente de la física, causada en parte por los avances en transportes y telecomunicaciones, ha hecho que de alguna manera sea menos relevante ha-

blar de la física en términos nacionales. Los avances tecnológicos han tenido una gran influencia en la física. Recuérdese que solamente había dos representantes estadounidenses en la conferencia de París de 1900 –en aquella época los viajes transatlánticos eran lentos y caros–; y que los físicos estadounidenses tuvieron problemas para unirse a la revolución cuántica después de 1925 por el retraso en las comunicaciones desde Europa –llevó tiempo antes de que las publicaciones físicas alemanas llegaran a los Estados Unidos–. Las condiciones de hacer física y de estar pendiente de la frontera de investigación han cambiado en una era en la cual el tráfico aéreo, la telefonía mundial, el correo electrónico y el servicio de Internet están a la orden del día.

En muchas ocasiones se ha alegado que la ciencia y la democracia van de la mano, y que la ciencia solamente puede florecer bajo condiciones políticas democráticas, pero esta afirmación no se ve apoyada por la historia de la física del siglo XX, e incluso menos por la historia de siglos anteriores. Cualquiera que sea la relación entre democracia y desarrollo científico, si es que existe ésta, no es simple. Para estar seguros, la física decayó a partir de 1933 pero difícilmente fue debido a que la dictadura nazi ahogó el espíritu libre de la democracia que se supone tan necesario para el sano desarrollo de la ciencia. Dado el gran número de físicos destacados que huyeron de Alemania, la caída fue bastante modesta y, como apuntamos en el capítulo 16, la física italiana vivió sus años dorados durante la dictadura fascista. De nuevo, y a pesar de las purgas de los años treinta y de la terrible pérdida de personas y recursos durante la guerra, la física en la Unión Soviética continuó estando a un nivel alto, tanto cualitativa como cuantitativamente durante la era Stalin y después.

La física en el siglo XX no sólo ha crecido en términos de mano de obra, organización, aparatos, producción investigadora y apoyo económico, sino que también ha progresado científicamente, produciendo mucho conocimiento nuevo sobre la naturaleza. No existe una relación automática entre el crecimiento cuantitativo y el progreso cualitativo en el conocimiento, y de hecho es difícil encontrar alguna correlación específica entre las dos en la física del siglo XX. Es notable que lo que la mayoría apuntaría como las más profundas y amplias innovaciones conceptuales del siglo, la relatividad y la mecánica cuántica, emergieron sin depender de un apoyo económico a gran escala ni de experimentos costosos. Esto no quiere decir que no haya ninguna correlación, ya que parece razonable asumir que los experimentos interesantes serán más probables en una comunidad de físicos grande y con buenos medios económicos que en una comunidad pequeña y con pocos medios.

El progreso en el conocimiento, a distinguir del crecimiento absoluto, llega de distintos modos. Un tipo de progreso, que podría llamarse el modo extensivo de progreso, consiste en extender la base de conocimiento en áreas de la naturaleza ya abiertas a la investigación. Esto suele ocurrir a través de medidas más precisas o a través del desarrollo de instrumentos que hagan posible investigar áreas más amplias de determinados campos. La espectroscopía, en el amplio sentido del término, es un buen ejemplo del modo extensivo de progreso y también lo es la física del estado sólido. Originalmente confinada a la física de metales, la física del estado sólido cubrió áreas

más y más amplias y se llegó a convertir en el campo moderno y muy amplio de la física de materia condensada. El progreso extensivo a menudo es minusvalorado porque se cree que meramente produce datos nuevos y conocimiento instrumental, sin embargo en realidad también es un agente poderoso para el cambio cualitativo. Esto se ve ilustrado en muchos casos mencionados en este libro, tales como las cuidadosas medidas de la radiación de cuerpos negros a finales de la década de los noventa del siglo XIX y la extensión de la observación telescópica en los años cincuenta para incluir las ondas de radio.

Otros tipos de progreso consisten en abrir nuevas ventanas a través de las cuales los secretos de la naturaleza puedan ser estudiados, esto es, el descubrimiento de fenómenos cualitativamente nuevos. La física moderna ha tenido gran éxito a este respecto, sobre todo quizás antes de 1940. Lo que se conoce generalmente como física moderna debe su propia existencia a tales descubrimientos, de los cuales los rayos X y la radiactividad fueron los más tempranos e importantes. Por fin, hay un tercer tipo de progreso, esencialmente teórico: la introducción de nuevas estructuras y principios que reorganizan y dan nuevo sentido a conocimiento ya obtenido. Tales principios hacen más que traer únicamente orden a lo que inicialmente parecían cuerpos desunidos de conocimiento. También son potentes en su sentido heurístico y, a través del siglo, han sido muy valorados por los físicos teóricos.

El progreso, sea cual sea el significado del término, ha sido un elemento de la física del siglo XX tan visible como su crecimiento. Aunque el progreso en el conocimiento no ha sido uniforme y ha variado de un campo a otro, ha sucedido de manera continua, casi siempre de modo acumulativo, en un frente muy amplio y a menudo de forma espectacular. En la década de 1990, los físicos sabían bastante más sobre cómo funciona la naturaleza que en la década de 1890. Por destacar únicamente un área, todo el conocimiento sobre las estructuras atómicas y subatómicas y las fuerzas que mantienen las partículas básicas juntas fue cosechado a lo largo del siglo XX. Con anterioridad a la década de 1890, prácticamente no se sabía nada sobre la constitución microscópica de la materia, y casi todo de lo poco que se sabía, o se creía saber, era gracias a los químicos más que a los físicos. Merece la pena mencionar el tema del progreso, no porque los físicos tengan ninguna duda sobre el tema, sino porque se ha convertido en una moda en algunos ambientes de la sociología y de la filosofía cuestionar la realidad del progreso científico. Hay especialistas que niegan seriamente que se pueda hablar de modo significativo de progreso en la ciencia. La respuesta simple a tal desatino sería echar un vistazo al avance de algúna área de la física moderna, como por ejemplo la conductividad eléctrica en los cuerpos metálicos o los procesos energéticos estelares, y comparar el estado del conocimiento en los años noventa con el de un siglo antes. Algunos sociólogos del conocimiento científico alegan haber mostrado que los «científicos en el frente de investigación no pueden resolver sus desacuerdos a través de una experimentación mejor, más conocimiento, más teorías avanzadas o pensamiento más claro» (Collins y Pinch 1992, p. 144). Quizá no haga falta señalar que a dicha extraña alegación le falta apoyo en la historia de la física del

siglo XX ya que los desacuerdos rutinariamente han sido solventados exactamente de esta manera.

La física y las otras ciencias

Durante la primera mitad del siglo XX, la física emergió como la ciencia número uno en cuando a *glamour*, un puesto que probablemente aún conserva a pesar de los problemas que ha tenido que encarar más recientemente. El público llegó a ver a los grandes físicos como magos con algún tipo de enlace directo con Dios o con la naturaleza. El más famoso de los grandes pensadores que fascinó más al público fue por supuesto Einstein, pero ha sido seguido por otros físicos famosos, como Bohr, Feynman, Gell-Mann y Hawking. Los grandes y visionarios teóricos representan una faceta de la fascinación de la física, el otro lado y más oscuro era el poder de la física que quedaba más dramáticamente simbolizado con las nubes de hongos causadas por las explosiones nucleares. Los físicos parecían cubrir todo el espectro, desde la profunda filosofía cuántica hasta los aparatos tecnológicos como el radar y el láser. Con respecto a la fascinación del público, ninguna otra ciencia pudo competir con la física. Un libro reciente emprende la categorización de los cien científicos más influyentes del mundo en la historia, incluyendo los psicólogos y los científicos sociales (Simmons 1997). Aunque no se debiera tomar el ranking como demasiado serio –¿cómo puede uno comparar significativamente a Arquímedes con Oppenheimer?– es interesante observar cómo de alto ha situado el autor a los físicos. Los tres primeros en la lista (Newton, Einstein y Bohr) son todos físicos y, entre los veinticinco científicos «más influyentes», doce son físicos, ocho de ellos pertenecientes al siglo XX.

La posición de dominio de la física entre las ciencias en los tres primeros cuartos de siglo se puede ilustrar por el impacto que la física ejerció en otras de las ciencias clásicas tales como la astronomía, la química, la geología y la biología. El impacto sucedió sobre todo a través de tres canales, siendo el más directo de ellos la migración de físicos a otras disciplinas científicas. En muchos casos, los jóvenes físicos migraron con éxito o realizaron un trabajo importante en una de las otras ciencias. Es digno de atención que haya habido muy pocos casos de tráfico inverso. Otro canal de impacto ha sido la adopción de canales físicos de pensamiento en ciencias que tradicionalmente eran ajenas e incluso hostiles a tales actitudes del trabajo científico. No menos importante fue la influencia en las ciencias no físicas de los instrumentos y técnicas dadas por la física experimental. En el caso de la química, en muchos modos la disciplina hermana a la física, esto no era un hecho nuevo. Es bien sabido, que en tiempos de Lavoisier, era una parte importante de la química física que emergió a finales de la década de 1880, pero en el siglo XX la química llegó a depender incluso más cercanamente de nuevos métodos experimentales originados en la física, como los rayos X, la difracción de los electrones, la espectroscopía RMN y la espectrometría de masas. A un nivel más fundamental, la química incluso estaba amenazada con convertirse en una rama de la física, en concreto en el sentido de que algunos físicos atómicos y cuánticos (incluyen-

do a Born y Dirac) alegaban que la química no era más que teoría cuántica aplicada. Cinco años antes de la llegada de la mecánica cuántica, Born escribió que «no hemos penetrado lejos en el vasto territorio de la química» pero «hemos viajado suficientemente lejos como para vernos en la distancia los pasos que deben ser atravesados antes de que la física pueda imponer sus leyes sobre la de su ciencia hermana» (Nye 1993, p. 229). Con la emergencia a finales de los años veinte de la química cuántica –una teoría primero desarrollada por físicos más que por químicos– el deseo imperialista de Born (y pesadilla de muchos químicos) parecía convertirse en realidad. Sin embargo, pronto se comprendió que ni siquiera las simples moléculas podrían ser reducidas a física cuántica sin la entrada empírica de los datos de los químicos. Lo que es lo mismo, la química teórica estaba profundamente afectada por la mecánica cuántica (y por otras ramas de la física) y el campo hasta cierto punto puede ser considerado como «física aplicada». Previamente hemos lidiado con el desarrollo de la astrofísica y los cambios fundamentales en las ciencias astronómicas que siguieron al tormentoso desarrollo de la física (capítulos 12 y 23).

En el caso de la geología, el impacto era menos directo, pero no obstante condujo a una reorientación drástica de esta ciencia, desde su posición tradicional como historia natural a una nueva «ciencia de la tierra» que fue modelada sobre los estándares de la física e hizo uso de instrumentos y razonamientos característicos de la física. Parte de las ciencias geológicas, tales como la geofísica y la sismología, ya estaban «fisicalizadas» a principios de siglo, especialmente bajo la influencia del físico alemán Emil Wiechert. Con la revolución de las placas tectónicas de los años sesenta, la transformación inspirada por la física fue completa.

Una historia un tanto similar puede contarse sobre el impacto de la física en la biología, donde la llegada de la biología molecular en los años treinta marcó una intrusión posterior del pensamiento físico y reduccionista en las ciencias naturales. Esto no es sorprendente, ya que varias de las personas más influyentes de la biología molecular habían recibido formación en física, incluidos Max Delbrück y Walter Elsasser, contando ambos con valiosas contribuciones a la física antes de que abandonaran el campo para dedicarse a la biología (y, en el caso de Elsasser, las ciencias de la tierra). Francis Crick, con fama de doble hélice, se graduó en física en 1938 y se convirtió a la biología sólo después del final de la guerra, en parte por la inspiración del libro de Schrödinger *¿Qué es la vida?* La dilucidación de la estructura del ADN en 1953, ampliamente percibida como el descubrimiento más importante de la biología moderna, era en gran parte el resultado del análisis de los patrones de difracción realizados por Maurice Wilkins, otro físico convertido en biólogo. La tendencia general de la biología en este siglo, y de la biología molecular en particular, ha estado muy influida por la física y un pensamiento reduccionista ha sido trasladado desde esta ciencia. En 1966, Crick escribió: «el fin último del movimiento moderno de la biología es de hecho explicar toda la biología en términos de física y química y existe una muy buena razón para ello: desde la revolución de la física a mediados de los años veinte, hemos tenido una cimentación teórica sólida para la química y las partes relevantes de la física [...] y

es la comprensión de que nuestro conocimiento al nivel atómico es seguro lo que nos condujo al gran influjo de los físicos y químicos hacia la biología» (Olby 1994, p. 425). En total, no sería exagerado decir que el camino y dirección globales de las ciencias en el siglo XX han estado fuertemente influidos por el desarrollo de la física.

Uno de los resultados más importantes de la ciencia de este siglo es lo que parece ser la validez ilimitada de las leyes básicas de la física. En la década de 1890, todavía era materia de debate si la segunda ley de la termodinámica era de aplicación para las células vivas y, más en general, si las leyes de la física eran aplicables en cualquier lugar de la naturaleza y en cualquier tiempo. Todavía no es obvio que las leyes tengan este rango amplio de validez, pero muchos años de investigación parecen confirmar que éste es de hecho el caso. Las leyes son válidas no solamente para los organismos vivos, sino que también son válidas para los lugares más distantes del universo, los centros de las estrellas y para el estado supercompacto del universo muy temprano de hace unos diez mil millones de años. Todos los intentos de dar leyes separadas para estratos separados del mundo han fracasado. Los físicos de final del siglo XX pueden alegar con algo de confianza (no confundir con certeza) que conocen las leyes fundamentales y que éstas son válidas para toda la naturaleza. Esto no significa que toda la naturaleza haya sido explicada por los físicos, ni que las otras ciencias hayan sido reducidas a la física. Pero sí significa que no hay fenómenos en la naturaleza cuya explicación requiera principios o leyes que estén en contradicción con aquellas aceptadas por los físicos (puede que aparezcan tales fenómenos, pero de momento no lo han hecho y no tenemos razones para asumir que lo hagan). Entonces, sin sugerir ningún tipo de reduccionismo simplista, hay un sentido en el cual puede decirse que es la más fundamental y la más general de todas las ciencias. Este punto de vista «imperialista» no es nada nuevo, pero sólo es en este siglo cuando ha sido sustantivizado y se ha convertido en más que un dogma de fe y de autocomplacencia.

Revoluciones conservadoras

Como se ha mencionado antes, el papel desempeñado por la física en áreas exteriores a la física ha cambiado completamente durante el siglo XX y convirtió la ciencia en una parte integrada en la sociedad posindustrial. Este hecho y los efectos que ha tenido en la organización y ejecución de la física es quizá el mayor cambio que ha ocurrido; cuando miramos hacia otros aspectos, está bastante claro que la descripción general ha sido tanto de continuidad como de discontinuidad, tanto de permanencia como de cambios revolucionarios. A escala ontológica, los cambios han sido sin duda muy profundos, en la mayor parte como resultado de la revolución cuántica –de acuerdo con Philip Anderson, «una dislocación que tiene que ser mentalmente sanada incluso entre muchos físicos» (Anderson 1995, p. 2018)–. La mecánica cuántica nos ha proporcionado estructuras fundamentales que no tienen similitud ninguna con todo lo que puede ser percibido o medido directamente. Nuestras creencias actuales sobre lo que, en última instancia, constituye el mundo distan mucho de las de la década de 1890, cuando todavía tenía sentido pensar en la materia como una colección de blo-

ques en miniatura. El vacío ha resultado ser cualquier cosa menos la «nadería» y está lleno de vida, de actividad y de propiedades. Éste es un resultado muy importante de la nueva física, pero en sí mismo no hubiera impactado a un físico de 1900, que estaba acostumbrado a pensar en el vacío como lleno de éter.

En algunos otros temas, la física y los físicos no han cambiado mucho a lo largo del siglo. De esta manera, las reglas fundamentales de este juego –la metodología de la investigación– son prácticamente tan iguales en la década de 1990 como lo que en la de 1890. Cómo evaluar una aseveración, qué cuenta como un buen experimento, procedimientos de prueba, la función de la matemática en el razonamiento físico y el uso de experimentos bien razonados; estos y otros temas metodológicos básicamente se han mantenido igual, aunque desde los años setenta los experimentos computerizados se han visto añadidos a los métodos de la física moderna. Si los jóvenes Rutherford o Sommerfeld hubieran sido catapultados a nuestro mundo, hubieran tenido muchos problemas, pero no insuperables, en entender muchas cosas sobre las teorías y experimentos de la física, y fácilmente hubieran valorados los métodos de la física moderna, tan cercanos a aquellos usados en su propia época. El mismo tipo de continuidad se da con los sueños y aspiraciones últimos de los físicos. Las ideas de unificación, belleza matemática y los principios generales como cimientos de la física no son productos finiseculares de la física del siglo XX. Aunque Planck o Mie no hubieran entendido ni las matemáticas ni la física de las teorías GTU, hubieran apreciado plenamente la idea general y el propósito de esta clase de teorías modernas.

No quiero aseverar que no ha habido cambios en los métodos de la física, sino que los métodos e ideas ampliamente diferentes de aquellos conocidos en el siglo XIX han sido relativamente sin importancia. Como apuntamos en el capítulo 27, ciertos campos de la física de altas energías (como la teoría de las supercuerdas y la cosmología inflacionaria) están tan alejados de los experimentos que no pueden ser probados empíricamente. La consistencia matemática y los argumentos estéticos por tanto tienden a convertirse en los métodos de demostración de la «verdad» de estas teorías. Ésta es una aberración de la metodología comúnmente aceptada de la ciencia, potencialmente peligrosa en este aspecto. A pesar de todo, no se debería sobredramatizar la situación ya que, por una parte, ésta es una tendencia solamente de un ámbito minúsculo de la física teórica y no afecta al 99 por 100 de la física en la cual la teoría y la experimentación tienen un sano contacto entre ellas. Además, realmente no es un problema nuevo. La teoría de vórtices de éter del siglo XIX, las teorías de campo unificadas de principios del siglo XX, la teoría fundamental de Eddington de los años treinta y la mayoría de las teorías posbélicas de la gravedad cuántica hicieron uso de estos estándar que no se basaban en la experimentación. Muchos años antes de los teóricos de las supercuerdas, había físicos que argumentaban por puro racionalismo. Por ejemplo, en una famosa declaración de 1933, Einstein sugirió que «la naturaleza es la comprensión de las ideas matemáticas más simples concebibles [...] [y] podemos descubrir, a través de construcciones puramente matemáticas, aquellos conceptos y aquellos contactos lícitos entre ellos que facilitan la clave para entender los fenómenos naturales» (Holton 1988, p. 252).

Así como los métodos de hacer física en esencial han permanecido inalterables, tampoco han cambiado los ideales de lo que la física debería ser y de cómo deben comportarse los físicos. La ciencia tiene sus normas culturales sin codificar –lo que el sociólogo Robert Merton llamó en 1942 el *ethos* científico o conjunto de imperativos institucionales–. Por ejemplo, los científicos generalmente se adhieren a la idea de «universalismo» (que la evaluación de las aseveraciones científicas debería ser impersonal y objetiva), piensan que debería evitarse el secretismo (una parte del «comunalismo») y aceptar el «escepticismo organizado» como la actitud adecuada ante las nuevas afirmaciones de nuevo conocimiento. Éstas y otras reglas ocasionalmente se infringen, pero no por ello dejan de ser aceptadas como reglas. Las normas que contribuyeron al final del asunto de los rayos N en 1903 eran en su mayoría las mismas que entraron en escena cuando la fusión fría fue anunciada en 1989.

Los grandes cambios ocurridos en la física del siglo XX se han basado en el conocimiento existente y en un sano respeto por las tradiciones. Ha habido varios intentos de basar la física en una cosmovisión enteramente nueva (tales como aquellos propuestos por Eddington y Milne en los años treinta), pero todos han fracasado. Puede parecer extraño que el respeto por la tradición pueda producir cambios revolucionarios, pero esto es justo lo que describió Thomas Kuhn en 1962 bajo la etiqueta de «ciencia normal». Por otro lado, los cambios que a veces le siguen a la ciencia regida por el paradigma o «normal» no son revoluciones en el sentido contundente de la palabra que sugirió Kuhn en 1962, o sea, nuevos paradigmas incompatibles y totalmente diferentes de los antiguos. No ha ocurrido tal revolución en la física del siglo XX. Después de todo, un físico teórico de los años noventa no tendrá problemas en entender el espíritu y detalles del trabajo de Planck de 1900 en el cual se introdujo la discontinuidad cuántica, tampoco un experimentador moderno dejará de apreciar el clásico artículo de J. J. Thomson de 1897 en el cual se anunció el electrón. No hay ninguna brecha insuperable de comunicación, ninguna inconmensurabilidad profunda entre la física de los años noventa y la de un siglo antes.

La lección a extraer del último siglo de física es que el conocimiento físico se ha expandido mucho y ha producido nuevas y muy mejoradas teorías, pero que éstas se han producido en su mayoría de manera acumulativa y sin una ruptura total con el pasado. Siempre ha sido importante el ser capaces de reproducir los éxitos de las teorías antiguas, y este sensato requisito garantiza una cierta continuidad en el progreso teórico. Los grandes descubrimientos y teorías de nuestro siglo desde luego no han dejado intacto al conocimiento más temprano, pero tampoco lo han convertido indiscriminadamente en no conocimiento. La mayoría de los hechos experimentales continúan siendo hechos incluso a la luz de las nuevas teorías. La observación de que el exceso de perihelio de Mercurio es de 0,43" por año fue explicada, no derrocada, por la teoría de Einstein de la relatividad y cualquier teoría futura de la gravitación tendrá que acomodarse a la realidad observada.

La mayor parte de la física parece estar firmemente estabilizada. Cada vez resulta más difícil imaginar que estas partes, tan comprobadas a conciencia y tan dependien-

tes de una red mayor de teorías y experimentos pueda cambiar drásticamente en el futuro. Durante varias décadas se ha considerado herético, incluso ridículo, sugerir que la ciencia se desarrolla «teleológicamente», esto es, hacia un cierto estado de conocimiento que refleja la verdadera estructura de la naturaleza. Es correcto, como apuntó el filósofo Nicholas Rescher, que «el progreso científico [s]ignificante es en general una materia que no consiste en añadir más hechos –como al rellenar un crucigrama– sino en cambiar la formulación en sí.» (Rescher 1978, p. 48). La relatividad, la mecánica cuántica y la teoría electrodébil son ejemplos de tales formulaciones cambiadas que al principio ni se apoyaban ni sugerían nuevos hechos experimentales. Pero no sólo la visión minusvalora el aspecto de «añadir más hechos», sino que también deja abierta la cuestión de la existencia o no del mejor marco teórico posible que dejará a una teoría en un estado estable o «terminado». Podemos sonreír por la ingenuidad de los físicos finiseculares que creyeron que la física básicamente había llegado a su estado final, pero su fracaso no implica que no exista dicho estado final. Ya que muchas teorías físicas propuestas durante la historia se han probado como erróneas, no se deduce de esto que aquellas aceptadas hoy estén equivocadas también y que sean reemplazadas por teorías enteramente nuevas.

Se podría especular que la historia podría repetirse a sí misma y que los físicos del mañana podrían encontrar fenómenos bastante nuevos en la naturaleza que demandasen una reformulación considerable de la física teórica –una especie de analogía a los sorprendentes descubrimientos de 1895-1897–. ¿Es plausible tal escenario? Parece que aunque no se pueda descartar dicha posibilidad, todavía parece menos posible que los físicos se hayan olvidado de algún aspecto de la naturaleza grande e importante. El moderno ejército de físicos y su arsenal de instrumentos sofisticados de alta precisión hacen que sea mucho más difícil que dichos fenómenos permanezcan escondidos, como en el caso de la radiactividad hace un siglo. Han pasado muchas décadas desde que un nuevo descubrimiento contradijera directamente una teoría fundamental. En 1986 fue anunciado el descubrimiento de una «quinta fuerza», una fuerza de rango intermedio que no podía ser explicada en la teoría establecida. Si se hubiera aceptado la aseveración, podría haber conducido a un gran cambio conceptual en la física teórica, pero eso no fue lo que ocurrió. Después de unos años de experimentos y de intenso debate, se comprobó que la quinta fuerza no era una amenaza a la física estándar que operaba con cuatro fuerzas de la naturaleza: la quinta fuerza no existe.

La física sin duda continuará evolucionando y produciendo muchos descubrimientos interesantes en el nuevo siglo. Pero es posible que el patrón de progreso en la física cambie y que muchos de los aspectos más fundamentales se mantengan tal como se conocen ahora. Siempre habrá trabajo emocionante por hacer y descubrimientos por venir, pero está lejos de ser cierto que el avance de la física en el siglo XXI será tan expansivo como lo ha sido en el siglo XX. Feynman, tal como lo citamos en el capítulo 26, creía que «la era en la que vivimos es en la que estamos descubriendo las leyes fundamentales de la naturaleza, y ese día no volverá nunca más». Sea la profecía de Feyn-

man correcta o no, sólo se podrá saber a través de los avances del siglo XXI. Quizá un historiador que escriba la historia de la física del siglo XXI citará a Feynman para demostrar su sabiduría, o quizá le citará para demostrar que estaba completamente equivocado.

Apéndice
Lecturas recomendadas

Capítulo 1

El capítulo se basa en parte en Kragh 1996a. Los estudios de la física del siglo XIX incluyen a Harman 1982 y Purrington 1997. Véase también Brush 1978, en especial para los contextos más amplios. Jungnickel y McCormmach 1986 está recomendado para el periodo entero hasta 1925 y es especialmente informativo sobre la física alemana. Visiones generales útiles de la física finisecular pueden encontrarse en Hiebert 1979 y Heilbron 1982. La cuestión de la plenitud de la ciencia se debate en Badash 1972 y los problemas de la descripción del mundo mecánico en Klein 1973. Sobre las especulaciones de los espacios cuatridimensionales y no euclídeos, véanse Bork 1964 y Beichler 1988. Los aspectos científicos y cuasicientíficos del concepto de éter son debatidos en Kragh 1989a y Cantor y Hodge 1981. Sobre la energética de Ostwald, véanse Hiebert 1971 y Hakfoort 1992. Las ideas de LeBon y el clima espiritual en el cambio de siglo son analizados en Nye 1974.

Capítulo 2

Los datos estadísticos sobre la física entorno a 1900 son presentados y debatidos en Forman, Heilbron y Weart 1975. Véanse también Hirosige y Nisio 1986 en subdisciplinas de física y Pyenson y Skopp 1977 para un análisis detallado de la educación en física en Alemania. Kevles 1976 compara las comunidades física, química y matemática en los Estados Unidos. Los datos de la descripción de Nagaoka de la física europea en 1910 están basados en Badash 1967 y Carazza y Kragh 1991. Los físicos italianos entre 1900 y 1904 se analizan cuantitativamente en Galdabini y Giuliani 1988. Jungnickel y McCormmach 1986 tiene mucha información sobre teóricos físicos alemanes. Sobre la física en América, véanse Kevles 1987 y Reingold y Reingold 1981.

Capítulo 3

La historia de los rayos X, la radiactividad, el electrón y otros aspectos de la física atómica, nuclear y de partículas se describe en Pais 1986. Un informe muy legible pero poco detallado se encuentra en Segré 1980. Sobre la ruta para descubrir la radiactividad de Becquerel, véase Martins 1997 y para los intentos tempranos de explicación del origen de la radiactividad, Kragh 1997a. El descubrimiento del electrón se trata en Falconer 1987, Feffer 1989, Dahl 1997 y Davis y Falconer 1997, de los cuales el último trabajo incluye reediciones de muchos artículos de Thomson. Arabatzis 1997 resume las historias de descubrimientos complejos. Los pseudodescubrimientos de la luz negra y de los rayos N se examinan en Nye 1974 y 1980. Sobre rayos magnéticos, véase Carazza y Kragh 1990, y sobre el descubrimiento de la radiación cósmica, Xu y Brown 1987 y De Maria, Ianniello y Russo 1991.

Capítulo 4

Conn y Turner 1965 incluye extractos o reproducciones completas de muchos de los artículos importantes sobre teoría atómica entre 1895 y 1914. Los aspectos del modelo atómico de Thomson son tratados en Sinclair 1987 y Kragh 1997a y 1997b. El modelo de Nicholson se analiza en McCormmach 1996 y el nacimiento del átomo nuclear de Rutherford en Heilbron 1968. Sobre la teoría atómica de Bohr, véanse Heilbron y Kuhn 1969, Heilbron 1981 y también French y Kennedy 1985. Los artículos de Bohr de 1913 y el memorando de Manchester se reproducen en Bohr 1963 con una introducción de Léon Rosenfeld.

Capítulo 5

Mucho se ha escrito sobre el temprano desarrollo de la teoría cuántica. El trabajo más completo probablemente es el volumen 1 de Mehra y Rechenberg 1982. Kangro 1976 incluye información plena sobre los primeros experimentos y Kuhn 1978 es un análisis detallado del desarrollo teórico desde Boltzmann hasta Planck. Sin embargo, debería mencionarse que la interpretación de Kuhn es controvertida y no aceptada en general.

Para la compleja cuestión de la relación entre los métodos de Boltzmann y Planck, véase también Darrigol 1988a. Otros libros recomendables de la historia de la teoría cuántica incluyen Hermann 1971, Hund 1974, Jammer 1966 y Darrigol 1992. Una historia concisa es presentada en Klein 1970. Los congresos de Solvay son examinados en Mehra 1975 y el congreso de 1911 es analizado en Barkan 1993.

Capítulo 6

Mendelssohn 1977 es una historia semipopular del desarrollo de la física de bajas temperaturas. El objeto de estudio es tratado de una forma más escolar en Dahl 1992, el cual ofrece una historia completa de la superconductividad, desde finales del siglo XIX hasta principios de la década de 1990. Véase también Dahl 1984 para el descubrimien-

to de la superconductividad. Otros aspectos del desarrollo de la criogenización se describen en Scurlock 1992. Las teorías de la conductividad eléctrica desde 1898 hasta los años veinte son el tema de Kaiser 1987. La historia de la superconductividad y la superfluidez también se analizan en detalle en Gavroglu y Goudaroulis 1989, donde el énfasis es en aspectos más generales y metodológicos. Un análisis de un físico de Leiden sobre el descubrimiento de la superconductividad y del laboratorio de Kamerlingh Onnes se puede encontrar en Casimir 1983.

Capítulo 7

Existe una rica literatura sobre la teoría especial de la relatividad y sus precursores que incluyen Holton 1988, Goldberg 1984 y Darrigol 1996. Sobre las teorías preeinsteinianas, véanse Hirosige 1976, Nersessian 1986 y Darrigol 1994. La teoría de 1905 de Einstein se analiza con gran detalle en Miller 1981. La mejor de las muchas biografías de Einstein es Pais 1982. Algunos de los desarrollos tempranos son analizados en Goldberg 1976 y Galison 1979. Sobre la historia temprana de la relatividad general, véanse Mehra 1974 y los análisis detallados de Norton 1985 y Earman y Glymour 1978. Las tres pruebas clásicas de la relatividad general son analizados, por ejemplo, en Roseveare 1982 (el avance del perihelio), Earman y Glymour 1980a (curvatura de la luz) y Earman y Glymour 1980b (corrimiento gravitacional hacia el rojo). Hentschel 1992 es un análisis útil de la actitud de Einstein hacia los experimentos y Hentschel 1990 provee de un análisis detallado de las reacciones científicas y no científicas a la teoría de la relatividad. Sobre la recepción de la relatividad en diferentes países, véase también Glick 1987.

Capítulo 8

La cosmovisión electromagnética se trata en McCormmach 1970 y Jammer 1961 incluye detalles condensados del concepto electromagnético de masa. Miller 1986, una colección de ensayos, lidia con la electrodinámica sin la relatividad, incluyendo un análisis detallado de la teoría de 1906 del electrón de Poincaré. Un debate sobre el electrón rígido de Abraham se encuentra en Goldberg 1970. Para los experimentos de variación de masa, véanse Miller 1981, Cushing 1981 y Batimelli 1981. El papel de la masa electromagnética en la temprana física atómica y nuclear se debate en Siegel 1978 y Kragh 1985 contiene información sobre los experimentos de variación de masa de los años veinte. La mejor fuente sobre la teoría de Mie y de otras teorías unificadas del primer tercio del siglo es Vizgin 1994.

Capítulo 9

Atherton 1984 es una descripción general de la historia de la tecnología eléctrica. Sobre la carga de bobinas y la telefonía de larga distancia, véase Wasserman 1985 y,

para el método de carga continua, Kragh 1994. La investigación temprana de AT&T está cubierta en Hoddeson 1981a y Fagen 1975, y Russo 1981 cuenta la interesante historia sobre el descubrimiento de Davisson y Germer de la difracción del electrón. Para detalles sobre el desarrollo de las válvulas de vacío, véase Tyne 1977. Sobre la investigación de Langmuir y de General Electric, véase Reich 1983 y 1985. Los aspectos sobre la física de la Primera Guerra Mundial se tratan en Hartcup 1988, Schröder-Gudehus 1978, Kevles 1987 y Cardwell 1975.

Capítulo 10

Sobre las políticas y subvenciones científicas en la República de Weimar, véanse Schröder-Gudehus 1978 y Forman 1974. Sobre las políticas científicas internacionales en los años veinte, véase también Cock 1983. Heilbron 1986 y Cassidy 1992 detallan descripciones interesantes de la ciencia alemana en el periodo visto desde las vidas de Planck y Heisenberg respectivamente. Los detalles sobre la física y las políticas científicas en la joven Unión Soviética se pueden encontrar en Josephson 1991. La ideología de los físicos alemanes es analizada en Forman 1973 y Forman 1971 arguye que el clima intelectual de la república de Weimar influyó decisivamente en el pensamiento de los físicos con relación a los fenómenos cuánticos. La controvertida tesis de Forman es criticada en Hendry 1980 y en Kraft y Kroes 1984.

Capítulo 11

Entre los muchos libros que lidian con la historia de la teoría cuántica en los años diez y veinte están los libros de Jammer 1966, Hendry 1984a, MacKinnon 1982, Darrigol 1992 y Mehra y Rechenberg 1982 y 1987. Para los aspectos de la teoría de Schrödinger, véase Kragh 1982b así como las contribuciones de Bitbol y Darrigol 1992. También de merecida consulta son las biografías de Pais 1991 (sobre Bohr), Cassidy 1992 (sobre Heisenberg), Dresden 1987 (sobre Kramers), Moore 1989 (sobre Schrödinger) y Kragh 1990 (sobre Dirac). La teoría de De Broglie es analizada en Darrigol 1993 y la historia experimental del dualismo onda-partícula se detalla en Wheaton 1983. El origen de la ecuación de Dirac se describe en Kragh 1981a y 1990 y en Moyer 1981. Sobre la recepción y transmisión de la mecánica cuántica, véase el volumen 4 de Mehra y Rechenberg 1982, Sopka 1988, Heilbron 1985, Cartwright 1987 y Kojevnikov y Novik 1989. De entre estas fuentes, Heilbron 1985 y Cartwright 1987 lidian con la falta de interés de los estadounidenses en los aspectos filosóficos. Las fuentes de artículos clásicos traducidos al inglés incluyen ter Haar 1967, Van der Waerden 1967 y Ludwig 1968.

Capítulo 12

Las fuentes sobre física nuclear se reproducen en Beyer 1949 y Brink 1965. Sobre los primeros modelos nucleares, véase sobre todo Stuewer 1983 y 1986a. Una revisión concisa se presenta en Badash 1983. Stuewer 1979 es un volumen de actas de conferencias de

la historia de la física nuclear en los años treinta. Para una descripción detallada de la controversia de Cambridge-Viena, véase Stuewer 1985a. Sobre el modelo de protón-electrón y sus problemas, así como otros aspectos de la física nuclear, véanse por ejemplo Pais 1986, Brown y Rechenberg 1996, Bromberg 1971 y Weiner 1972. La primera historia del neutrino se cubre en Brown 1972 y la idea del mundo reticular de Heisenberg en Carazza y Kragh 1995. Sobre el descubrimiento del deuterón, véanse Stuewer 1986c y Brickwedde 1982. Mi descripción de la temprana astrofísica nuclear está tomada de Kragh 1996b. Un análisis más detallado de la fase más temprana puede ser encontrado en Hufbauer 1981. Los primeros ciclotrones están descritos con gran detalle en Heilbron y Seidel 1989 e información sobre las máquinas de alta tensión de Cavendish puede encontrarse en Hendry 1984b. Una perspectiva interesante sobre la implicación de Bohr en la física nuclear se da en Aaserud 1990.

Capítulo 13

La sección sobre Dirac y el positrón se basa en Kragh 1990. Sobre este tema, véanse también Hanson 1963, Moyer 1981, Kragh 1989, de Maria y Russo 1985 y Roqué 1997a. Entre los trabajos que tratan de manera extensa la primera física de partículas, Brown y Hoddeson 1983 es muy informativo, sobre todo en lo relativo a la teoría, también lo son Pais 1986 y Brown y Rechenberg 1996. Rueger 1992 nos da un buen detalle de los problemas de la electromecánica cuántica de los años treinta. Los intentos de resolver los problemas introduciendo una longitud menor se analizan en Kragh 1995. La física de rayos cósmicos en la época, el descubrimiento del muón y la relación entre teoría y experimentación se analizan en de Maria y Russo 1989, Galison 1983, 1987 y 1997, y Cassidy 1981. Sobre el descubrimiento de los mesones y la primera teoría de los mesones, véanse Brown 1981, Darrigol 1988a, Brown y Hoddeson 1983, y Brown y Rechenberg 1996. Reediciones de varios de los artículos más importantes de la época se encuentran en Cahn y Goldhaber 1989 y sobre investigación sobre rayos cósmicos en Hillas 1972.

Capítulo 14

La literatura sobre la filosofía cuántica es vasta, pero casi toda ella no histórica. Entre los trabajos históricos que lidian con la situación en los años veinte y treinta están Hendry 1984a, MacKinnon 1982 y Jammer 1996. Whitaker 1996 es una buena descripción semihistórica y en su mayoría no técnica. Jammer 1994 es aún la mejor descripción histórica-filosófica. Sobre distintos aspectos de la historia de la complementariedad, véanse Beller 1992, Heilbron 1985 y Holton 1988. La prueba de la imposibilidad de Von Neumann está revisada de manera crítica en Pinch 1977 y Caruana 1995. Cushing 1995 es un examen histórico-filosófico detallado de las interpretaciones de la mecánica cuántica con un énfasis en concreto sobre la posición de Bohm. Wheeler y Zurek 1983 incluye reproducciones de la mayoría de las fuentes importantes del periodo entre 1926 y 1980.

Capítulo 15

La tendencia cosmofísica de los años treinta está analizada en Kragh 1982a, en la cual está basada parte del capítulo. Sobre las teorías de Eddington, véanse Kilmister 1994 y, por su filosofía de la ciencia, Yolton 1960. La inspiración de Schrödinger de Eddington está documentada en Rueger 1988. El sistema de Milne es tratado en Harder 1974 y Urani y Gale 1993 y las visiones cosmológicas de Dirac en Kragh 1990. Las relaciones numéricas entre constantes naturales están descritas en Barrow 1981 y Barrow y Tipler 1986.

Capítulo 16

Beyerchen 1977 fue la primera y todavía es una de las mejores descripciones detalladas de físicos en el Tercer Reich. Véase también Walker 1995, que se centra en el proyecto de energía nuclear alemana. Entre las antologías, Renneberg y Walker 1994 y Mehrtens y Richter 1980 son valiosas colecciones de análisis de ciencia y tecnología alemana entre 1933 y 1945. Una excelente colección de fuentes primarias anotadas, traducidas al inglés, se puede encontrar en Hentschel 1996. Las condiciones de los físicos en la Alemania nazi también están cubiertas en muchas biografías, como la de Heilbron 1986 (Planck), Cassidy 1992 (Heisenberg) y Sime 1996 (Meitner). El impacto del régimen nazi en la investigación física en Alemania está examinado cuantitativamente en Fischer 1988. Graham 1972 incluye capítulos sobre la física y la cosmología en la Unión Soviética en la era de Stalin. Josephson 1991 da un análisis detallado de la física soviética en la época, cubriendo contextos tanto ideológicos como institucionales. Sobre esta materia, véanse también Gorelik 1995, Vucinich 1980 y Kojevnikov 1991. Sobre la física italiana en la era de Mussolini, véase Holton 1978.

Capítulo 17

Sobre la física estadounidense en los años treinta, véanse Weiner 1970 y Kevles 1987. Weiner 1969 lidia con los físicos refugiados en los Estados Unidos y Weart 1979a es una descripción cuantitativa detallada de la física americana sobre todo del periodo de entreguerras. Entre los mejores estudios de la migración de físicos en los años treinta están Holton 1983, Hoch 1983 y Rider 1984. Véase también Fermi 1971, escrito por la viuda de uno de los más famosos emigrantes físicos. Stuewer 1984 examina el caso de la física nuclear desde una perspectiva de la emigración.

Capítulo 18

El descubrimiento de la fisión está tratado en muchos lugares, como Graetzer y Anderson 1971, Weart 1983 y Krafft 1983. Un estudio detallado de la reacción de 1939 a la noticia del descubrimiento de la fisión se da en Badash, Hodes y Tiddens 1986. Graetzer y Anderson 1971 incluyen reediciones traducidas de varios de los artículos

clave desde 1934 a 1945, al igual que hace Wohlfarth 1979 (en inglés y alemán). Las recopilaciones personales de dos de los físicos centralmente involucrados se dan en Frisch y Wheeler 1967. Sobre la transmisión y primeros trabajos en la fisión, véanse Stuewer 1985b y Weart 1976. Stuewer 1994 provee de detalles sobre el contexto físico nuclear de los años treinta. El trabajo francés sobre energía nuclear está descrito por completo en Weart 1979b y el trabajo británico en Gowing 1964. Una historia completa y muy legible del camino que condujo a las explosiones atómicas de 1945 se da en Rhodes 1986. Los detalles de los proyectos nucleares alemanes y rusos, sólo mencionados con brevedad en el texto, pueden ser encontrados en Powers 1993, Walker 1995 (ambos sobre Alemania) y Holloway 1994 y Rhodes 1995 (sobre Rusia). Para más información sobre el intento japonés de desarrollar una bomba atómica, véase Wilcox 1985.

Capítulo 19

No existe una buena historia de la física nuclear de la posguerra, pero unos cuantos picos de su desarrollo pueden seguirse a través de los discursos de los Nobel y del estudio de Brink 1995. Véase también Lee y Wiringa 1990 sobre el modelo de armazón SHELL nuclear. Mladjenovic 1998 es una descripción completa y útil. Para los primeros descubrimientos de los elementos transuránicos, se puede consultar Weeks 1968, que es todavía el trabajo modelo sobre el descubrimiento de los elementos químicos. Sobre la historia de la energía nuclear en una perspectiva global, véase Goldschmidt 1982. Las armas nucleares y las políticas nucleares en el periodo de posguerra son los objetos de estudio de numerosos libros y artículos. Badash 1995 es una buena introducción. Una descripción más detallada se encuentra en Hewlett 1989, por ejemplo, y una buena colección de fuentes sobre las políticas nucleares desde 1939 a 1990 se incluye en Cantelon, Hewlett y Williams 1991. Sobre el desarrollo de la bomba de hidrógeno, véase Rhodes 1995. La historia de la fusión controlada se relata en Hendry 1987 (prehistoria), Hendry y Lawson 1993 (proyecto británico), Post 1995 (sobre todo aspectos científicos) y Bromberg 1982 (proyecto estadounidense).

Capítulo 20

Existe un vasto catálogo de literatura sobre aspectos políticos y militares de la física de la posguerrra (y de la ciencia en general), en su mayoría concentrada en la escena estadounidense en los dos decenios posteriores a 1945. Forman 1987 es un gran ejemplo. Se encuentran más análisis generales en Dickson 1984 y Greenberg 1967. Sobre la física de gran ciencia, véanse Galison y Hevly 1992 y Weinberg 1967. Schweber 1989 es un ensayo interesante sobre los contextos políticos e ideológicos de la física de partículas de los años cincuenta, y Hoddeson *et al.* 1997 incluye aspectos de gran ciencia de altas energías en los años sesenta y setenta. Sobre aceleradores y gran ciencia en Japón, sólo mencionado de forma breve en el texto, véase Hoddeson 1983. La historia

del CERN está detallada en Hermann *et al.* 1987-1990 y Krige 1996. Una comparación bibliométrica interesante entre los aceleradores americanos y europeos sobre 1960-1985 se encuentra en Irvine *et al.* 1986 y, con mayor detalle, en Irvine y Martin 1985.

Capítulo 21

La literatura secundaria sobre física de partículas es completa. Pais 1986 es útil, sobre todo en la teoría. Doncel *et al.* 1987 se centra en principios de simetría y Cahn y Goldhaber 1989 relata una descripción condensada apoyada por reediciones de noventa y ocho artículos experimentales notables. Brown, Dresden y Hoddeson 1989, Hoddeson *et al.* 1997, y Foster y Fowler 1988 son recopilaciones muy informativas. Newman e Ypsilantis 1996 es una enorme colección de artículos históricos sobre física de altas energías moderna y se dirige sobre todo a los físicos. Diferentes aspectos de la física de interacciones débiles se tratan en Cline y Reidasch 1984 y Franklin 1986. Análisis bibliométricos completos de la física de interacciones débiles entre 1950 y 1975 se incluyen en White, Sullivan y Barboni 1979 y Koester, Sullivan y White 1982. Sobre aspectos experimentales de la historia de los quarks, véanse, por ejemplo, Pickering 1981 y el más popular Riordan 1987. Los detalles sobre detectores y muchos otros aspectos de «la cultura material» de la física de altas energías se dan en Galison 1997. Para otra literatura, más especializada, véase Hovis y Kragh 1991.

Capítulo 22

Un tratamiento histórico, completo y detallado, de la QED hasta aproximadamente 1952 se encuentra en Schweber 1994a. Otros aspectos de la física de renormalización se analizan en Brown 1993. Véanse también las descripciones históricas de QED en Weinberg 177 y Aramaki 1987 y 1989. Una selección de los artículos más importantes de QED entre 1927 y 1953 está reproducida en Schwinger 1958. El desarrollo del programa de matriz S y temas relacionados desde sobre 1943 a 1985 se analizan de manera experta en Cushing 1990 y con menos exigencia en Freundlich 1980. Cao 1997 es una historia conceptual sintética, trazando el desarrollo de las teorías de campo hasta aproximadamente 1990. El descubrimiento de las corrientes neutras son analizadas en Galison 1987 y, desde un punto de vista distinto, por Pickering 1984b. Pickering 1984a y Pais 1986 son relatos valiosos de la física de partículas en los años sesenta y setenta y Cahn y Goldhaber 1989 incluye reediciones de la mayoría de los artículos pioneros experimentales. Hoddeson *et al.* 1997 es una gran fuente con respecto a la física de partículas entre 1965 y 1980. Sobre el descubrimiento en 1983 de los bosones de vector intermedios, véase por ejemplo la popular descripción en Watkins 1986. Más bibliografía en Hovis y Kragh 1991.

Capítulo 23

Partes del capítulo se apoyan en Kragh 1996b, el cual da una descripción completa de la cosmología entre 1930 y 1967. Sobre los aspectos del desarrollo de la cosmología

moderna, véanse también Bertotti *et al.* 1990 y Lightman y Brawer 1990. Hetherington 1993 es una recopilación útil de artículos sobre la historia y la filosofía de la cosmología y Bernstein y Feinberg 1986 incluye una selección de artículos clásicos. Harwit 1981 lidia con los descubrimientos astrofísicos de un modo original y fascinante. El destino de la relatividad general entre 1925 y 1955 se debate en Eisenstaedt 1989. Sobre los desarrollos de la posguerra de la relatividad general, véanse Thorne 1994, Will 1993 y las contribuciones de Hawking e Israel 1987. La controversia sobre al atribución de Weber de haber detectado las ondas gravitacionales se examina en Collins 1992.

Capítulo 24

La mejor y más completa historia de la física de estado sólido es Hoddeson *et al.* 1992, un proyecto conjunto que cubre el desarrollo de la disciplina desde sus raíces del siglo XIX hasta aproximadamente 1960. He usado en concreto las contribuciones de Hoddeson, Baym y Eckert 1992, Braun 1992 y Weart 1992. También valioso es Eckert y Schubert 1990, que enfatiza los aspectos de ciencia aplicada y Braun y MacDonald 1978 que lidia sobre todo con la electrónica de semiconductores. Para una descripción detallada de la invención del transistor, véanse Hoddeson 1981b y Riordan y Hoddeson 1987. Sobre la investigación de la superconductividad posterior a 1930, véanse Dahl 1996, Gavroglu y Goudaroulis 1989 y Bardeen 1973. El descubrimiento y primeros desarrollos de la conductividad en T_C alta se cubren en Hazen 1988.

Capítulo 25

La evolución de la microelectrónica se cubre, por ejemplo, en Eckert y Schubert 1990, Braun y MacDonald 1978 y Riordan y Hoddeson 1997. Sobre el temprano desarrollo de las tecnologías de microondas, véanse Forman 1992 y 1995. La historia del láser se describe en Bromberg 1991 y Bertolotti 1983. Sobre la fibra óptica, véanse Faltas 1988 y Bray 1995. La historia de los Bell Telephone Laboratories, Smits 1985, es una fuente de interés general sobre muchos aspectos de la tecnología de comunicaciones. Sobre la investigación de los laboratorios Bell, véase también Bernstein 1984.

Capítulo 26

Los datos sobre la física estadounidense alrededor de 1965-1985 son debatidos en Brinkman 1986. Sobre la crisis de la física estadounidense, véanse Kevles 1987 y Schweber 1994b y 1995. La ola más general de contracultura, incluyendo versiones de la anticiencia y de las ciencias alternativas, es analizada en Easlea 1973, Nowotny y Rose 1979 y Burnham 1987. El debate moderno sobre el fin de la ciencia es el objeto de análisis de Horgan 1996 y hay contribuciones en Elvee 1992. Para una perspectiva filosófica, véase Rescher 1978.

Capítulo 27

No existe un buen trabajo histórico sobre las teorías de campo unificada y de partículas de la posguerra. Para la fase más temprana, véase Vizgin 1994. La historia de teorías de gravedad cuántica está revisada en brevedad en Ashtekar 1991. Las grandes teorías unificadas hasta los primeros años ochenta están descritas en Pickering 1984a y, a escala popular, en Trefil 1983. Una recopilación de las fuentes primarias de teorías unificadas modernas puede encontrarse en Zee 1982 y, enfocándose en las aspectos astrofísicos y cosmológicos, en Schramm 1996. Sobre las teorías de supercuerdas, véanse Davies y Brown 1988, Galison 1995 y Schwarz 1996.

Capítulo 28

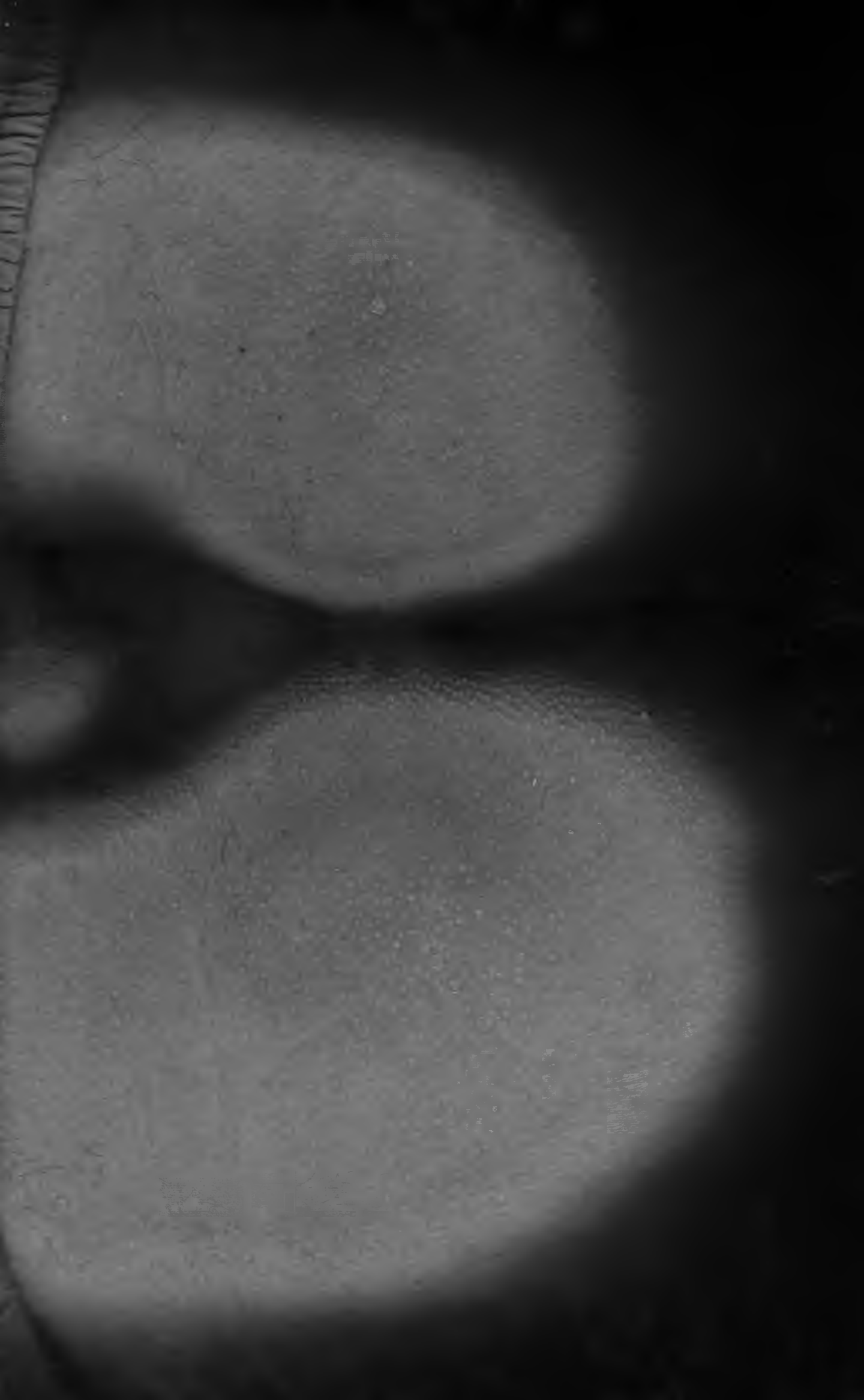
Las motivaciones de los Nobel y sus discursos, junto con ensayos biográficos, están publicados en una serie de setenta volúmenes hasta el momento, véase [Nobel] 1967-1997. El origen y primeros desarrollos de la institución Nobel están descritos en Crawford 1984 y una completa lista de nominadores y nominados desde 1901 hasta 1937 está incluida en Crawford, Heilbron y Ullrich 1987. Para el análisis de los procesos de los premios Nobel de Física, véase Friedmann 1981 y 1989. Crawford, Sime y Walker 1997 es uno de los pocos trabajos sobre la física Nobel de la posguerra (en este caso, un «no premio» más que un premio).

Bibliografía

Abreviaturas usadas para las publicaciones periódicas:

AHES	*Archive for the History of Exact Sciences*
AJP	*American Journal of Physics*
AS	*Annals of Science*
BW	*Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*
HS	*Historia Scientarium*
HSPS	*Historical Studies on the Physical Sciences* (desde 1988: *Historical Studies in the Physical and Biological Sciencies*)
NS	*New Scientist*
PS	*Perspectives on Science*
PRSA	*Proceedings of the Royal Society of London, series A*
PT	*Physics Today*
RHS	*Revue d'Histoires des Sciences*
RMP	*Reviews of Modern Physics*
RSS	*Rivista di Storia della Scienze*
SHPMP	*Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*
SHPS	*Studies in the History and Philosophy of Science*
SIC	*Science in Context*
SSS	*Social Studies of Science*
T&C	*Technology and Culture*

AASERUD, F. (1990), *Redirecting Science: Niels Bohr, Philantropy, and the Rise of Nuclear Physics,* Cambridge, Cambridge University Press.

ANDERSON, Ph. (1971), «Are the big machines necessary?», *NS* 82, pp. 510-514.

— (1972), «More is different», *Science* 177, pp. 393-396.